

مقدمة قصيرة جدًّا

فيليب ملادينوف

علم الأحياء البحرية

ترجمة ياسمين العربي

علم الأحياء البحرية

مقدمة قصيرة جدًّا

تأليف
فيليب ملادينوف

ترجمة
ياسمين العربي

مراجعة
هاني فتحي سليمان



علم الأحياء البحرية

Marine Biology

فيليب ملادينوف

Philip Mladenov

الناشر مؤسسة هنداوي
المشهرة برقم ١٠٥٨٥٩٧٠ بتاريخ ٢٦ / ١ / ٢٠١٧

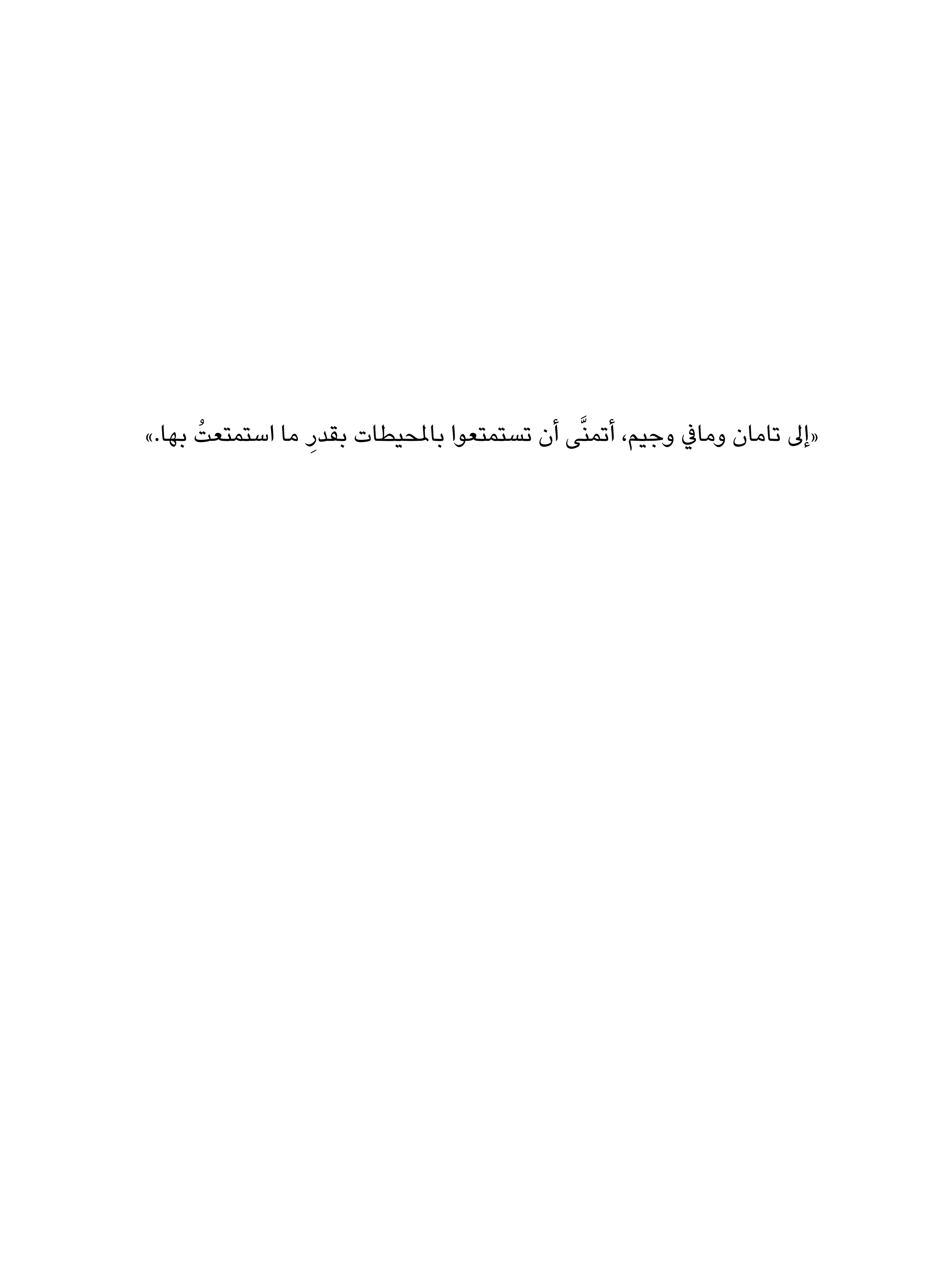
يورك هاوس، شييت ستريت، وندسور، SL4 1DD، المملكة المتحدة
تليفون: ٨٣٢٥٢٢ ١٧٥٣ (٠) ٤٤ +
البريد الإلكتروني: hindawi@hindawi.org
الموقع الإلكتروني: https://www.hindawi.org

تصميم الغلاف: ولاء الشاهد

الترقيم الدولي: ٩٧٨ ١ ٥٢٧٣ ٣٢٠١ ٠

صدر الكتاب الأصلي باللغة الإنجليزية عام ٢٠٢٠.
صدرت هذه الترجمة عن مؤسسة هنداوي عام ٢٠٢٣.

المحتويات



«إلى تامان ومافي وجيم، أتمنَّى أن تستمتعوا بالمحيطات بقدرِ ما استمتعتُ بها.»

شكر وتقدير

أشعر بخالص الامتنان لجيني نوجي وفريقِ مطبعة جامعة أكسفورد، لما قدَّموه من نصح وتشجيع طَوال هذا المشروع، كما أشكر روجر هاريس على قراءته المتأنية لمخطوطة الكتاب وتعليقاته الفَطِنة عليه.

مقدمة

المحيطات هي الموئل الطبيعي الأكثرُ تميزًا وروعةً على كوكبنا. فهي تُغطي ٧١ في المائة من سطح الكوكب، وتُشكِّل مساحةً شاسعة من المجال الحيوي السائل المتَّصل عالميًّا، وتدعم نظامًا من أشكال الحياة، فائقَ التنوُّع وبديعًا في تكيُّفه؛ بدءًا بالفيروسات المجهرية، والبكتيريا، والعوالق، وصولًا إلى أكبر الحيوانات التي لا تزال تعيش على كوكبنا الأرضي، وتضم العديدَ من أكثر نظم الأرض البيئية البالغة الأهمية، والباعثة على الفضول، والمتعذر سبرُ أغوارها. لهذه الأسباب وحدها، فإن علم الأحياء البحرية — أي دراسة طرق معيشة كائنات المحيطات وتفاعلها معًا ومع بيئاتها — هو موضوعٌ متأصل الأهمية وشديد الجاذبية، لطالما غذَّى لدينا التساؤل، والفضول، والدوافع الاستكشافية على مدارِ أجيال.

ولكن الآن بعد أن دخلت الأرض عصر الأنثروبوسين، تلك الحِقبة الجيولوجية الجديدة التي يُحدِث فيها البشرُ تغيرًا كبيرًا في البيئة العالمية، تشهد المحيطات تغييراتٍ سريعةً وعميقةَ الأثر. ومن ثَم تكتسب دراسةُ علم الأحياء البحرية أهميةً وإلحاحًا زائدَين؛ إذ يُناضل الناس من أجل فهْم هذه التغييرات وإدارتها. فنحن ندرك الآن تمامَ الإدراك أن النظم البيئية الفعالة في المحيطات توفِّر خدماتٍ ضروريةً لبقاء البشر ونفعهم؛ حيث تُنتج نصفَ الأكسجين الذي نتنفسه، وتعمل على استقرار المناخ على الكوكب، وتحافظ على النظم البيئية التي تحمي سواحلنا، وتُمدُّنا بغذاءٍ صحي وفير، وتضم مجموعةً متنوعة من الكائنات الحية التي تزودنا بالمنتجات الطبيعية اللازمة في مجالَي الأدوية والتكنولوجيا الحيوية، وتَدعم العديد من أشكال الترفيه والسياحة.

وبذلك فإن قيمة النُّظم البيئية الصحية والسليمة للمحيطات لا تُقدَّر بثمن؛ فمِن دونها لا توجد الحياة كما نعرفها على الأرض. على الرغم من ذلك يحاول خبراءُ الاقتصاد وصانعو السياسات بانتظامٍ وضْع قيمةٍ نقدية على خدمات المحيطات الرئيسية؛ من أجل

تسليط الضوء على أهمية الاستثمار في حماية المحيطات، ويُحقِّقون في ذلك نتائجَ مدهشة بالفعل. وقد قدَّمَت دراسةٌ حديثة تقديرًا غايةً في التحفظ لقيمة «الناتج البحري الإجمالي» السنوي لخدمات المحيطات، الذي يمكننا اعتباره معادلًا لإجماليِّ الناتج المحلي لإحدى الدول؛ إذ قدَّرَته بتريليونين ونصف التريليون دولار أمريكي، كما قدَّرَت إجماليَّ قاعدة أصول المحيطات بقيمة ٢٤ تريليون دولار أمريكي؛ فلو كانت المحيطات دولةً لعُدَّت أحدَ الاقتصادات السريعة النمو، ضمن أكبر اقتصادات العالم.

مما يدعو للأسف أن الأنشطة البشرية قد ألحقَت الضررَ بالمحيطات سنواتٍ عديدة. فقد بات من الواضح الآن أن الصيد الجائر، وتدمير الموائل، والتلوُّث، وانتشار الأنواع الغريبة، وانبعاث غازات الدفيئة المُغيِّرة للمناخ تُحدِث تغييراتٍ كبيرة في المحيطات وفي أشكال الحياة التي تعيش بداخلها وتُلحق بها أضرارًا جسيمة. يؤدي هذا إلى تدمير جمالها الطبيعي وتنوُّعها البيولوجي كما ينال بشدةٍ من قدرتها على توفير نُظم دعم الحياة والخدمات التي تُعزز من سلامتنا ورخائنا. وحيث إن عدد السكان سيزيد من ٧٫٧ مليار إلى نحو ٩٫٨ مليار على مدى الثلاثين سنةً القادمة، فستشتدُّ مثلُ هذه الضغوط وتُشكِّل تهديدًا متزايدَ الخطورة على رَفاهيَة البشرية.

غير أنه من المُبشِّر سرعةُ تنامي الوعي المجتمعي، والاهتمام، والانشغال بالمسائل البيئية البحرية؛ مما أدَّى إلى تصاعد الاهتمام لدى عددٍ أكبر من الناس في جميع أنحاء العالم بعلم الأحياء البحرية، وسعيهم إلى تعزيز فهمهم للتأثيرات التي نُلحِقُها بالمحيطات. يهدف هذا الكتاب إلى الإسهام في هذا الاتجاه الميمون بتوفيره لمقدمةٍ ميسرة، وشاملة، ومواكبةٍ لأحدث التطورات عن بيئة المحيطات وطبيعة الحياة فيها بحيث يتسنَّى للقرَّاء إيلاءُ تقديرٍ أفضل للجمال والتعقيد المتأصلَين في النظم البحرية، ولأهميتها لكوكبنا وللمجتمع البشري، ولبعضٍ من عواقبِ زيادة التأثيرات البشرية، وفي النهاية، لبعض الإجراءات اللازمة لوضعنا على الطريق الصحيح في سبيلِ إقامة علاقةٍ أكثرَ استدامة مع محيطاتنا؛ كي نتمكَّن من إعادتها إلى حالتها الأصلية، وحمايتها من أجل الأجيال القادمة.

الفصل الأول

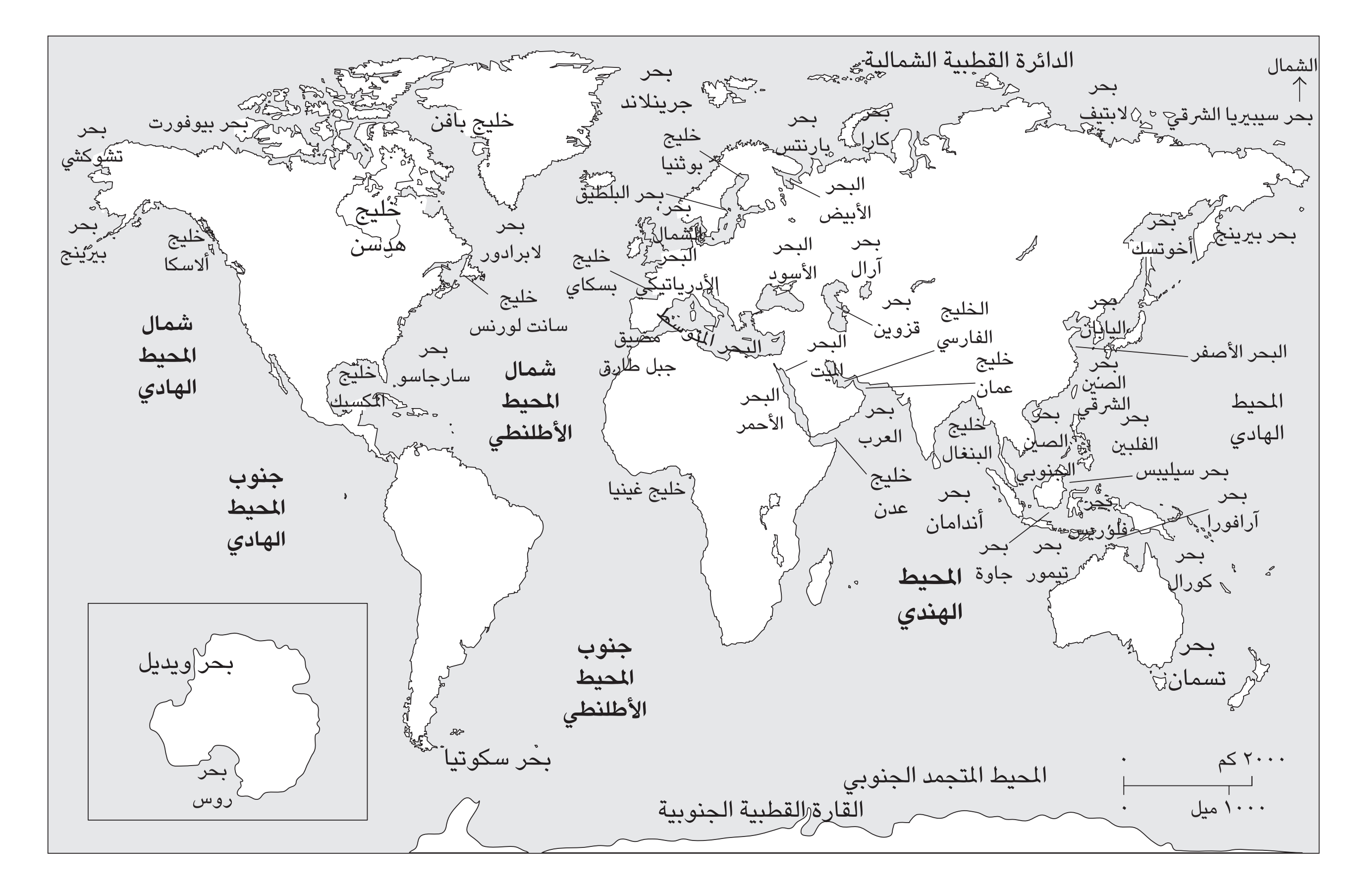
بيئة المحيطات

بالنظر إلى كوكبِنا من الفضاء، نجد أن خصيصته الطبيعية الأعظم تغلب عليه بوضوحٍ؛ ونقصد تلك الكتلة الشاسعة، والعميقة، والمترابطة من مياه البحار، المتمثلة في المحيط العالمي. تبلغ مساحةُ المحيط العالمي نحو ٣٦٢ مليون كيلومتر مربع، ويبلغ متوسط عمقه ٣٦٨٢ مترًا، ويحوي كميةً هائلة من المياه تُقدَّر بنحو ١,٣٤ مليار كيلومتر مكعب، وتُشكِّل نحو ٩٧ في المائة من جميع المياه الموجودة على كوكبنا. وكما قال الكاتب العلمي آرثر سي كلارك: «كم هو من غير الملائم أن نُسمي هذا الكوكب كوكب الأرض، في حين أنه محيط.»

جغرافيا المحيط العالمي

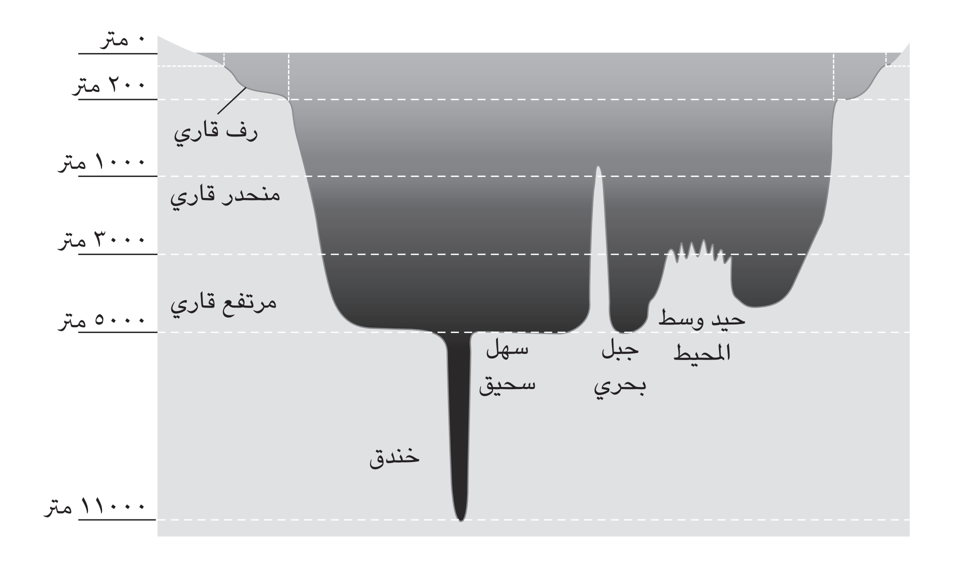
انقسم المحيط العالمي إلى خمسة محيطات إقليمية؛ وهي المحيط الهادي، والمحيط الأطلنطي، والمحيط الهندي، والمحيط المتجمِّد الشمالي، والمحيط المتجمِّد الجنوبي؛ ويمتد الأخير من ساحل القارة القطبية الجنوبية إلى دائرة عرض ٦٠ درجة جنوبًا (انظر شكل ١-١). وقد جرَت العادة بين غير المتخصصين على تسمية العديد من المناطق التي تقع على أطراف هذه المحيطات الإقليمية بالبحار، ومنها على سبيل المثال البحرُ الكاريبي أو البحر الأحمر.

المحيطات هي أحواضٌ كبيرة مملوءة بمياه البحر، تشترك في بِنْياتها بسِمات مميزة. (انظر شكل ١-٢). تتكون حافة كلِّ حوض من امتدادٍ ضحلٍ قليل الانحدار من الكتلة القارية اليابسة المتاخمة، ويُسمى بالرفِّ القاري. وتمتدُّ عادةً الرفوف القارية من اليابسة إلى أعماقٍ تبلغ بضع مئات من الأمتار، ويتراوح عرْضها من بضعة كيلومترات إلى مئات الكيلومترات.



شكل ١-١: المحيط العالمي.

عند الحافة الخارجية للرف القاري، تنخفض أرضيةُ المحيط انخفاضًا مفاجئًا وحادًّا مُشكِّلةً ما يُعرف بالمنحدر القاري، الذي يمتد في العمق من كيلومترين إلى ثلاثة كيلومترات. ثم يُفسح المنحدر القاري المجالَ لمرتفعٍ قاريٍّ أقلَّ ميلًا، ينحدر مسافةَ كيلومتر آخر أو نحو ذلك؛ ليندمج في النهاية بامتدادٍ شاسع من قاعٍ مسطَّح وأملسَ للمحيط، يُعرف بالسهل السحيق، ويمتدُّ على عمقٍ من أربعة كيلومترات إلى ستة كيلومترات تقريبًا، ويُمثل نحو ٧٦ في المائة من أرضية المحيط العالمي.



شكل ١-٢: مقطع عرضي بياني لحوض أحد المحيطات.

تنقطع السهول السحيقة بحيود وسط المحيط الشاسعة، وهي سلاسل جبلية تحت الماء شكَّلها نشاطٌ بركاني مكثَّف، وترتفع آلافَ الأمتار فوق السهول السحيقة المحيطة. تشكِّل حيود وسط المحيط سلسلةً متواصلة من الجبال تمتد خَطيًّا لمسافة ٦٥ ألف كيلومتر عبر أرضية أحواض المحيط العالمي، فيما يُشبه خيوطَ كرة البيسبول.

في بعض الأماكن على طول حواف السهول السحيقة، تقطع قاعَ المحيط خنادقُ ضيقةٌ تنخفض إلى أعماقٍ هائلة — من ثلاثة كيلومترات إلى أربعة كيلومترات أسفلَ أرضية المحيط المحيطة — ويبلغ طولها آلافَ الكيلومترات غير أن عرْضها لا يزيد على عشرات

الكيلومترات. نجد مثالًا تقريبيًّا على ذلك في أبعاد الأخدود العظيم، التي هي في المتوسط نحو ١٫٦ كيلومتر للعمق، و٤٤٦ كيلومترًا للطول، ونحو ١٦ كيلومترًا للعرض في المتوسط. وأعمق نقطة نعرفها في المحيط العالمي — على عمق نحو ١١ كيلومترًا تحت مستوى سطح البحر — هي في قاع أحد هذه الخنادق، وهو خندق ماريانا الذي يقع قبالةَ اليابان وجزر الفلبين.

تُشكِّل الجبال البحرية سمةً مميزة أخرى لأحواض المحيطات. وتتكون في العادة من براكينَ غائصة منقرضة بارتفاع ١٠٠٠ متر أو أكثر فوق أرضية المحيط المحيطة، ولكنها لا تصل إلى سطح المحيط. ومن ثَم تقع قممها على مئاتٍ إلى آلاف الأمتار تحت سطح المحيط. توجد الجبال البحرية عادةً في سلاسلَ أو حشودٍ مرتبطة بحيود وسط المحيط، غير أن بعضها يرتفع من أرضية المحيط في حالات متفردة. ويحوي المحيط العالمي ما يُقدر بنحو ١٠٠ ألف أو نحو ذلك من الجبال البحرية التي ترتفع إلى أكثر من كيلومتر واحد فوق أرضية المحيطات العميقة المحيطة، ونحو ١٣ ألف جبل بحري يرتفع إلى أكثر من ١٫٥ كيلومتر.

موائل المحيطات

تعيش الكائنات البحرية في جميع أنحاء المحيط العالمي؛ من سطحه المضاء بأشعة الشمس إلى قاعِ أعمقِ خنادقه. كما تستطيع العيش في المحيط المفتوح، أو ما يُسمى بمنطقة البحر المفتوح، أو عند قاع المحيط؛ أي المنطقة القاعية. وتُعرف الكائنات الحية الدقيقة العالقة في منطقة البحر المفتوح بالعوالق. العوالق النباتية هي تلك الكائنات الحية العالقة والقادرة على صُنع طعامها بنفسها عن طريق البناء الضوئي، بينما العوالق الحيوانية هي حيوانات عالقة صغيرة. أما الحيوانات الأكبر حجمًا التي تسبح على الدوام في الماء؛ فتُعرف باسم السابحات.

أصبح الآن الاعتقادُ باستعمار الكائنات الحية لكلِّ جزء من أجزاء البيئة البحرية من المسلَّمات على الرغم من الاقتناع الواسع الانتشار الذي ساد في القرن التاسعَ عشر بعدم وجود حياةٍ فيما كان معروفًا في ذلك الوقت باسم «المنطقة العديمة الحياة»، وهي أي جزء من المحيط أسفل عمق ٣٠٠ قامة (نحو ٥٥٠ مترًا). فالبيئة في تلك الأجزاء كانت تُعد منطقةَ ظلام ميتة؛ أي موحشة للغاية لأيِّ شكل من أشكال الحياة. غير أن هذه الفكرة ولَّت إلى غيرِ رجعة بعد البعثة التاريخية لسفينة «إتش إم إس تشالنجر» (١٨٧٢–١٨٧٦)،

وهي أول سفينة تستكشفُ بشكل شامل الأجزاءَ العميقة لأحواض المحيط وتكشف عن الحياة البحرية في أعماقٍ تقترب من ستة آلاف متر.

نعلم الآن أن المحيطات تعجُّ في الواقع بتنوعٍ ضخم في أشكال الحياة. فالفيروسات، وهي أكثرُ أشكال الحياة بدائيةً، تتميز بوفرةٍ مذهلة؛ إذ توجد في تجمُّعاتٍ من عشرات المليارات لكل لتر من مياه البحر، وتوجد البكتيريا في تجمعاتٍ من مليار أو أكثر لكل لتر، وتوجد العوالق النباتية بعشرات الملايين لكل لتر، وتوجد العوالق الحيوانية بالآلاف لكل لتر، كما تعيش عدةُ مئات الآلاف من الأنواع من اللافقاريات، والأسماك، والثدييات، والزواحف بأعداد كبيرة في جميع أنحاء المحيط العالمي.

فما هي إذن خصائصُ البيئة التي تَشغلها هذه الوفرةُ في أشكال الحياة؟

الملوحة

المياه في المحيطات كمياه البحار، منقوع خفيف من الأيونات، أو الأملاح، الذائبة. الكلوريد وأيونات الصوديوم هي الأملاح السائدة في مياه البحر، إلى جانبِ كمياتٍ أصغرَ من أيونات أخرى؛ مثل الكبريتات، والمغنيسيوم، والكالسيوم، والبوتاسيوم (انظر جدول ١-١).

جدول ١-١: الأيونات الأساسية في مياه البحر

الأيون	الحجم (جرام/كيلوجرام من مياه البحر)
كلوريد (Cl^-)	١٩,٣٥
صوديوم (Na^+)	١٠,٧٦
كبريتات ($SO_4{}^{2-}$)	٢,٧١
مغنيسيوم (Mg^{2+})	١,٢٩
كالسيوم (Ca^{2+})	٠,٤١
بوتاسيوم (K^+)	٠,٤٠
الإجمالي	٣٤,٩٢

ويُطلق على الكمية الإجمالية من الأملاح الذائبة في مياه البحر مصطلحُ الملوحة. تبلغ درجة ملوحة مياه البحر عادةً نحو ٣٥؛ أي ما يُعادل نحو ٣٥ جرامًا من الأملاح في كيلوجرام واحد من مياه البحر. غير أن هذه الدرجة قد تتفاوت، لا سيما في الخلجان شبه المغلقة المعرَّضة لمعدَّلات تبخُّرٍ عالية؛ مما يزيد بدَوره من ملوحتها، أو المعرَّضة لتدفق المياه العذبة في شكل أمطار، أو جرَيان الأنهار، أو ذوبان الجليد، وهي عواملُ تعمل على تقليل الملوحة.

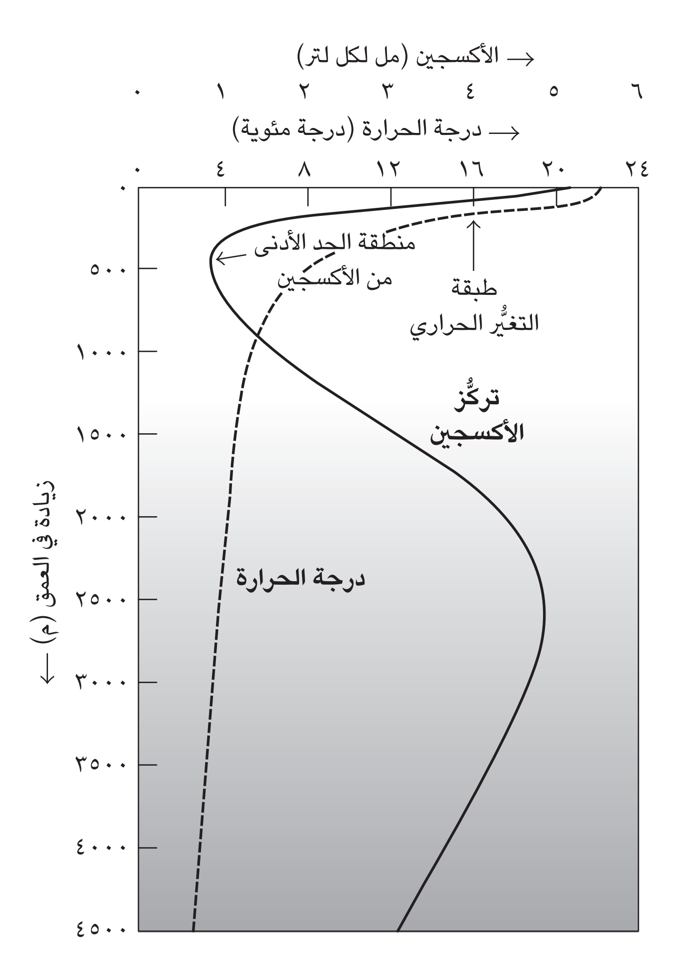
درجة الحرارة

تعيش معظم الكائنات البحرية في مياه البحر التي تظل في نطاقٍ معتدل نسبيًّا من درجة الحرارة مقارنةً بالظروف المتطرِّفة للبيئات على اليابسة. تكون المياه السطحية في الأجزاء الاستوائية من أحواض المحيطات دافئةً باستمرار طوال العام؛ إذ تتراوح من ٢٠ درجة مئوية إلى ٢٧ درجة مئوية، وبحدٍّ أقصى ٣٠ درجة مئوية تقريبًا في الخلجان الاستوائية الضحلة في ذروة الصيف. بينما من ناحية أخرى قد تصل مياهُ البحر السطحية في الأجزاء القطبية من أحواض المحيطات إلى −١٫٩ درجة مئوية.

تنخفض درجات حرارة المحيطات عادةً مع ازدياد العمق، ولكن ليس على نحوٍ موحَّد. كثيرًا ما توجد منطقةٌ متميزة من التحوُّل السريع في درجات الحرارة، تفصل بين مياه البحر الدافئة على السطح وتلك الأكثر برودةً على أعماقٍ أكبر. وتُعرف هذه المنطقة بطبقة التغيُّر الحراري (انظر شكل ١-٣).

تمثِّل طبقة التغيُّر الحراري سمةً قوية، وواضحة المعالم، ودائمةً في مياه المحيطات الاستوائية. قد تبدأ من عمق نحو ١٠٠ متر وتكون في سُمك ١٠٠ متر تقريبًا. وقد تكون درجات الحرارة في المحيط فوق طبقة التغيُّر الحراري استوائية؛ ٢٥ درجة مئوية أو أكثر، بينما لا تزيد على ستٍّ أو سبع درجات مئوية أسفلَ طبقة التغيُّر الحراري. وبدايةً من ذلك العمق تنخفض درجة الحرارة بالتدريج البطيء مع زيادة العمق. وتُمثل طبقات التغيُّر الحراري في مناطق المحيط المعتدلة ظاهرةً تتحكم فيها المواسمُ بشكل كبير؛ إذ تكون مستقرة في الصيف عندما تُسخِّن الشمس المياهَ السطحية، ثم تنهار في الخريف والشتاء. بينما لا توجد طبقات التغيُّر الحراري عادةً في المناطق القطبية للمحيط العالمي.

كما يؤدي تغيُّر المناخ العالمي الذي يتسبَّب فيه الإنسان، والذي يَنتج عنه زيادةُ متوسط درجات حرارة الهواء العالمية، إلى ارتفاع درجات الحرارة في المحيطات. إذ تمتص المحيطات



شكل ١-٣: رسمٌ نموذجي للمحيط الاستوائي يُظهر طبقةَ التغيُّر الحراري ومنطقة الحد الأدنى من الأكسجين.

تقريبًا كلَّ الدفء الزائد الناتج عن انبعاثات غازات الدفيئة من الأنشطة البشرية وظاهرة الاحتباس الحراري الناتجة عنها؛ فقد استوعبَت المحيطات خلال الأربعين سنةً الماضيةِ نسبةً مذهلة من الحرارة الزائدة، وهي ٩٣ في المائة. وبذلك فإن لهذا التسرُّب للحرارة في المحيطات دورًا كبيرًا في حماية البشرية من تغيُّر المناخ بتخفيف الارتفاع في درجات

حرارة الغلاف الجوي الذي كان من شأنه أن يحدُث لولاه. ولتتضحَ الصورة؛ لو كانت الحرارة المتولدة بين عامَي ١٩٥٥ و٢٠١٠ قد تسربَت جميعها إلى الغلاف الجوي بدلًا من المحيطات، لكان متوسط درجات حرارة الهواء السطحي العالمية قد زاد بنحو ٣٦ درجة مئوية، بدلًا من زيادته الحاليَّة التي تبلغ ١٫١ درجة مئوية.

ولكن نتيجةً لذلك تقترب المياه السطحية لمعظم أجزاء المحيط العالمي الآن من أن تكون أكثرَ دفئًا بمعدَّل درجة مئوية ممَّا كان عليه الأمر قبل ١٤٠ عامًا، وبمعدَّل ثلاث درجات مئوية في بعض الأماكن. وستبدأ درجات الحرارة في وقتٍ لاحق من هذا القرن في الارتفاع في الأجزاء العميقة من المحيطات، فضلًا عن اختلاط مياه البحر السطحية الأكثر دفئًا ببُطءٍ على أعماقٍ أكبر. يتسبَّب هذا الاتجاهُ نحو الاحترار في انخفاضٍ سريع في سُمك الجليد البحري وفي المساحة التي يُغطِّيها في المحيط المتجمِّد الشمالي، وكذلك في ترقُّق الرفوف الجليدية في القارة القطبية الجنوبية. كما يؤثِّر على الكائنات البحرية وعلى عمل النُّظم البيئية البحرية بمجموعةٍ متنوعة من الطرق المهمة التي سنستكشفها على مدار فصول الكتاب.

الضوء

تتفاوت كميةُ ضوء الشمس التي تضرب سطح المحيطات تفاوتًا كبيرًا؛ تبعًا لاختلاف أوقات اليوم، وتغطية السُّحب، وأوقات السنة، وخطوط العرض. ويعتمد العمق الذي يتمكَّن ضوء الشمس المتاح من اختراق سطح المحيطات إليه (الطبقة المضاءة بأشعة الشمس أو المنطقة الضوئية للمحيطات) إلى حدٍّ كبير على كمية الجسيمات العالقة في مياه البحر. وتتكوَّن هذه الجسيمات من خليطٍ من الرواسب العالقة والمواد العضوية الحية والميتة. من المتعارف عليه أن الضوء لا يخترق إلى عمقٍ يَزيد على ١٥٠ مترًا إلى ٢٠٠ متر في معظم أنحاء المحيط العالمي، مع امتصاص الضوء الأحمر في الأمتار القليلة الأولى واختراق الضوءَين الأخضر والأزرق لأمتار أعمق. وقد لا يزيد عمقُ اختراق الضوء في البحار الساحلية المعتدلة على بضع عشرات من الأمتار في أوقات معينة من السنة بسبب كثرة عدد الجسيمات في مياه البحر.

الضغط

يُشكِّل الضغط إحدى السمات المميزة للبيئة البحرية. ويزداد الضغط في المحيطات بمعدَّل وحدةِ ضغطٍ جوي واحدة كل ١٠ أمتار (تعادل وحدةُ الضغط الجوي الواحدة تقريبًا

ضغطَ الهواء عند مستوى سطح البحر). وبذلك يتعرض الكائن الحي الذي يعيش على عمق ١٠٠ متر على الرف القاري لضغطٍ أكبر ١٠ مرات من الكائن الحي الذي يعيش على مستوى سطح البحر، ويتعرض الكائن الحي الذي يعيش على عمق خمسة كيلومترات في أحد السهول السحيقة لضغط يزيد نحو ٥٠٠ مرة عن ذلك الذي يتعرض له كائنٌ حي يعيش على السطح، وتتعرض تلك الكائنات الحية التي تعيش في الأجزاء الأعمق في خنادق المحيطات لضغطٍ يزيد بنحو ألف مرة عن تلك التي تعيش في مستوى سطح البحر؛ حيث يُعادل الضغط في هذه الأعماق ١٠ آلاف طن لكل متر مربع.

الأكسجين

تتمتع معظم أجزاء المحيط العالمي بوفرةٍ نسبية من الأكسجين الذائب. غير أن كمية الأكسجين في مياه البحر أقلُّ بكثيرٍ مما في الهواء؛ إذ تحتوي مياهُ البحر عند درجة حرارة ٢٠ درجة مئوية على قرابة ٥٫٤ مليلترات من الأكسجين لكل لتر من مياه البحر، بينما يحتوي الهواء في درجة الحرارة هذه على نحو ٢١٠ مليلترات من الأكسجين لكل لتر. وكلما كانت مياه البحر أكثرَ برودة، زادت نسبة الأكسجين بها، فعلى سبيل المثال تحتوي مياه البحر عند درجة حرارة صفر مئوية على نحو ٧٫٨ مليلترات من الأكسجين لكل لتر.

ولكن الأكسجين غير موزَّع بالتساوي حسب العمق في المحيطات. فنِسَب الأكسجين مرتفعة عادةً في طبقة سطحية رفيعة بعمق ١٠ أمتار إلى ٢٠ مترًا. وذلك لأنه يمكن للأكسجين من الغلاف الجوي أن ينتشر هنا بحرِّية في مياه البحر، بالإضافة إلى وفرة العوالق النباتية في الطبقة المضاءة، التي تنتج الأكسجين من خلال عملية البناء الضوئي. ثم غالبًا ما ينخفض تركيزُ الأكسجين بسرعةٍ مع النزول إلى العمق ليصل إلى مستوياتٍ منخفضة للغاية، تقترب أحيانًا من الصفر، على أعماق من ٢٠٠ إلى ١٠٠٠ متر تقريبًا. ويُشار إلى هذه المنطقة باسم منطقة الحد الأدنى للأكسجين (انظر شكل ١-٣). تنشأ هذه المنطقة عن انخفاض معدَّلاتِ تجدُّد الأكسجين المنتشر من الطبقة السطحية للمحيط، بالإضافة إلى ارتفاع معدَّلات نضوب الأكسجين عن طريق الاضمحلال البكتيري للمواد العضوية الدقائقية الهابطة من السطح.

أسفل منطقة الحد الأدنى للأكسجين، يزداد محتوى الأكسجين مع الازدياد في العمق بحيث تحتوي أعماق المحيطات على نسبٍ شديدة الارتفاع من الأكسجين، على الرغم من أنها عادةً لا تكون بذلك الارتفاع الذي تتميز به الطبقة السطحية. تعكس المستويات الأعلى من

الأكسجين في أعماق المحيطات إلى حدٍّ ما أصلَ كتل مياه البحر في الأعماق، التي تتكون من مياه البحر الباردة الغنية بالأكسجين التي تغوص بسرعةٍ من سطح المحيطات القطبية؛ ومن ثَم تحافظ على محتواها من الأكسجين. علاوةً على ذلك، وبالمقارنة مع الحياة في المياه القريبة من السطح، فإن الكائنات الحية في أعماق المحيطات شحيحةٌ نسبيًّا وذات معدَّلات أيض منخفضة؛ ومن ثَم لا تستهلك سوى القليل من الأكسجين المتاح.

ثاني أكسيد الكربون وتحمُّض المحيطات

على عكس الأكسجين، سرعان ما يذوب ثاني أكسيد الكربون (CO_2) في مياه البحر. ثم يتحول معظمه إلى حمض الكربونيك (H_2CO_3)، وأيون البيكربونات (HCO_3^-)، وأيون الكربونات (CO_3^{2-})، حسَب نسبة جميع الأشكال الأربعة الموجودة في اتزانٍ معقَّد، كما هو مبيَّن في المعادلة التالية:

$$CO_2 + H_2O \longleftrightarrow H_2CO_3 \longleftrightarrow H^+ + HCO_3^- \longleftrightarrow H^+ + CO_3^{2-}$$

أيون البيكربونات (HCO_3^-) هو الشكل السائد بكمية كبيرة في مياه البحر، بينما توجد الأشكال الأخرى بكمياتٍ أقل بكثير. غير أن التغيرات في تركيز ثاني أكسيد الكربون تؤثِّر على هذا الاتزان؛ ومن ثَم على الرقم الهيدروجيني لمياه البحر. على سبيل المثال، في حالةِ إضافة الكثير من ثاني أكسيد الكربون في مياه البحر، يفقد بعضٌ من حمض الكربونيك (H_2CO_3) المتاح أيونَ هيدروجين H^+، وهو ما يخفِّض الرقم الهيدروجيني ويُنتج المزيدَ من أيونات البيكربونات (HCO_3^-). علاوةً على ذلك، يتفاعل بعضٌ من أيون الهيدروجين الإضافي هذا مع بعض أيونات الكربونات المتاحة (CO_3^{2-})، ما يُقلل من توافرها. في المقابل، ينتج عن إزالة ثاني أكسيد الكربون المزيدُ من حمض الكربونيك (H_2CO_3)، ومن ثَم ربط المزيد من أيونات الهيدروجين، وهو ما يزيد الرقم الهيدروجيني ويُوفر المزيد من أيونات الكربونات (CO_3^{2-}).

تتميز مياه البحر طبيعيًّا ببعض القلوية، برقم هيدروجيني يتراوح من نحو ٧٫٧ إلى ٨٫٢، وقد تكيفَت الكائنات البحرية جيدًا للحياة ضمن هذا النطاق. يصل عادةً الرقم الهيدروجيني لمياه البحر بالقرب من سطح المحيطات إلى أعلى طرف النطاق؛ وذلك لأن الكائنات الحية الوفيرة التي تقوم بالبناء الضوئي في الطبقة المضاءة تمتصُّ ثاني أكسيد الكربون. علاوة على ذلك، تكون مياه البحر السطحية أكثرَ دفئًا بشكل عام من مياه

المحيطات العميقة، وكلما ارتفعَت درجة حرارة مياه البحر، قلَّ ثاني أكسيد الكربون الذي يُمكنها امتصاصه. في الأجزاء العميقة الأكثر برودةً من المحيطات، حيث تغيب عملية البناء الضوئي، تكون تركيزات ثاني أكسيد الكربون أعلى، ويصل الرقم الهيدروجيني في الغالب إلى أدنى طرف النطاق.

نتيجةَ الاتزان بين كلٍّ من ثاني أكسيد الكربون وحمض الكربونيك والبيكربونات والكربونات في مياه البحر، يمتلك المحيط العالمي مخزونًا ضخمًا من الكربون غير العضوي، الذي له آثار مهمة في الحياة البحرية والمجتمع البشري. من منظور بيولوجي، فإن الكربون لا يمثل على الإطلاق عاملًا مقيدًا لنمو الكائنات الحية البحرية التي تقوم بالبناء الضوئي كما هي الحال في النباتات الأرضية. ومن منظورٍ شامل للكوكب، يمثل المحيط العالمي مصرفًا طبيعيًّا هائلًا لثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي، وهو أحد غازات الدفيئة الفاعلة في تغير المناخ.

في الوقت الحاضر، يمتصُّ المحيط العالمي ٢٥ في المائة على أقل تقدير مما يقرب من ٤١ مليار طن من ثاني أكسيد الكربون الذي يُبث في الغلاف الجوي كل عام نتيجة نشاطات البشر من حرقٍ للوقود الأحفوري وإزالة الغابات من على سطح الكوكب، ويمثِّل هذا ما يقرُب من ١٫٢ مليون طن من ثاني أكسيد الكربون في الساعة. وثمة ٢٥ في المائة أخرى أو نحو ذلك تمتصها الغابات، مع تراكم الكمية المتبقية في الغلاف الجوي. والنتيجة النهائية هي ارتفاع تركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي حاليًّا بمعدَّل نحو ثلاثة أجزاء من كل مليون جزء في السنة، وهذا هو السبب في ارتفاع تركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي للكوكب من ٢٧٨ جزءًا في المليون فيما قبل العصر الصناعي إلى ما يزيد على ٤٠٥ أجزاءٍ في المليون الآن، وازديادها بمعدَّلات سريعة. من المفجع معرفةُ أنه لولا امتصاص المحيط العالمي لكميات كبيرة من ثاني أكسيد الكربون البشري المنشأ، لتخطَّت تركيزاتُ ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي الآن ٤٦٠ جزءًا في المليون.

ومن ثَم فإن المحيط العالمي يؤدي دورًا أساسيًّا في تثبيط معدَّل تغيُّر المناخ الذي يتسبب فيه الإنسان؛ ليس فقط عن طريق امتصاص الحرارة الزائدة من الغلاف الجوي، ولكن أيضًا بتطهيره من الكثير من ثاني أكسيد الكربون الزائد المنبعِث في الغلاف الجوي منذ وقت الثورة الصناعية. من المؤسف أن كل هذه الكمية من ثاني أكسيد الكربون المُمتصَّة تبدأ في تغيير الكيمياء الأساسية للمحيط العالمي؛ مما يجعله أكثرَ حمضيةً في المتوسط، وهي عملية تُعرف باسم تحمُّض المحيط.

كان متوسط الرقم الهيدروجيني لمياه البحر السطحية في عام ١٨٧٠ نحو ٨,١٨. وهو الآن نحو ٨,٠ إلى ٨,١، ومن المتوقَّع أن يصل بحلول عام ٢١٠٠ إلى نحو ٧,٧ إلى ٧,٨ إذا استمر البشر في إطلاق ثاني أكسيد الكربون البشري المنشأ بمعدَّلات إطلاقه الحاليَّة. تبدو هذه وكأنها تغييرات صغيرة من الناحية العددية، ولكن نظرًا إلى أن الرقم الهيدروجيني هو مقياس لوغاريتمي، فإنها تُعادل نحو ٣٠ في المائة، ومن ثَم ١٧٠ في المائة زيادة في الحموضة. معدَّل التغيير هذا أسرعُ بنحو ١٠ مرات من أي شيء حدث خلال آخر ٦٥ مليون سنة. عندما تختلط مياه البحر السطحية المُحمَّضة تدريجيًّا بالمياه العميقة، يتأثر المحيط العالمي بأكمله.

يتسبَّب تحمُّض المحيطات بالفعل في انخفاض الرقم الهيدروجيني للعديد من مناطق المحيط العالمي إلى مستوياتٍ أقلَّ من النطاق التي اعتادت الكائنات البحرية العيشَ فيه بشكل طبيعي. أصبح القياس الشائع للرقم الهيدروجيني للمياه السطحية في الوقت الحاليِّ أقلَّ من ٨,٠، بينما قيسَت قِيَم الرقم الهيدروجيني في بعض المناطق بأقلَّ من ٧,٦. يؤثِّر الآن انخفاض الرقم الهيدروجيني في المحيطات على العديد من أنواع الكائنات البحرية، خاصةً تلك التي تملك أصدافًا خارجية أو هياكلَ عظمية داخلية تحتوي على كربونات الكالسيوم، مثل الشعاب المرجانية، والحلزون الصدفي، والمحار، وقنافذ البحر، ونجم البحر وبعض أنواع العوالق والطحالب. تستخدم هذه الكائنات الحية الكربونات في مياه البحر لتصنيع أصدافها أو هياكلها العظمية. وكما ذكرنا آنفًا، عندما ينخفض الرقم الهيدروجيني، تقلُّ نسبة الكربونات في مياه البحر، ما يجعل من الصعب على هذه الكائنات الحية أن تبنيَ أصدافًا أو هياكلَ عظمية مناسبة أو أن تنموَ. علاوة على ذلك، فكلما زاد نضوب الكربونات، تبدأ مياه البحر في سحب الكربونات من الأصداف والهياكل العظمية لهذه الكائنات؛ مما يؤدي إلى تآكلها وإضعافها مع إحداث تأثيرات واضحة على صحتها.

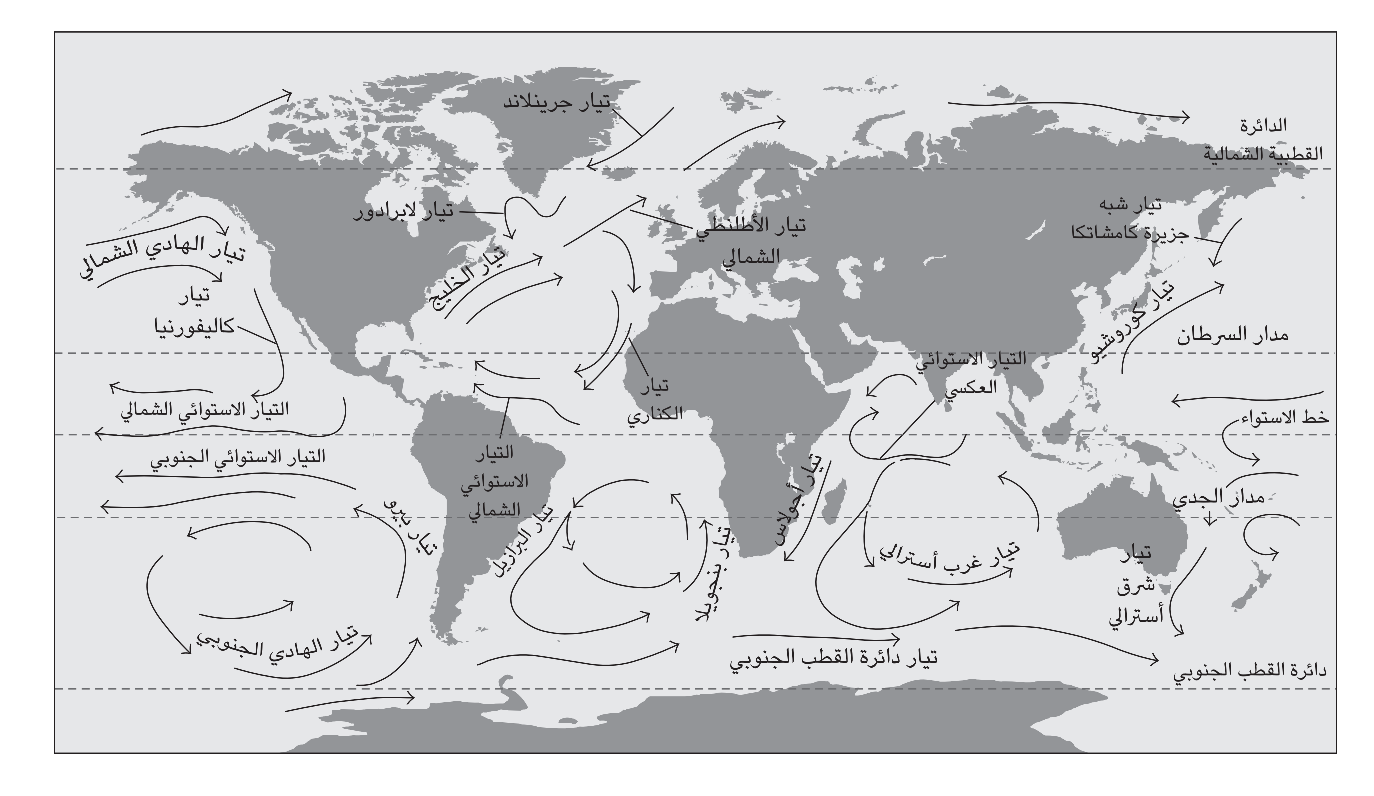
تكشف الأبحاث الجارية عن العديد من الأمثلة على الآثار السلبية لتحمُّض المحيطات على الحياة البحرية. وقد لوحظَت تلك الآثار بالفعل في الفورامنيفرا، وهي كائنات مجهرية توجد بوفرةٍ في العوالق، وتُكوِّن أصدافًا من كربونات الكالسيوم. أصداف الفورامنيفرا في المحيط المتجمد الجنوبي أرقُّ الآن بشكلٍ ملحوظ، مقارنةً بعيناتها المحفوظة من حِقبةِ ما قبل الثورة الصناعية. وقد أظهرت الدراسات التي أُجريَت على الشعاب المرجانية أن تحمُّض المحيطات يُقلل بشكل كبير من قدرة بعض الأنواع على إنتاج هياكلها العظمية، وهو ما يؤثِّر على نموها وقدرتها على التعافي من الضغوط البيئية الأخرى. كما تبيَّن أيضًا أن

أصداف فراشات البحر، أو جناحيات الأرجل — وهي قواقع بحرية عالقة صغيرة — تذوب في مستويات الرقم الهيدروجيني المتوقَّع الوصولُ إليها في المحيطات بحلول عام ٢١٠٠. لفراشات البحر أهميةٌ بالغة في المحيطات القطبية وشبه القطبية حيث تأكُلها الحيتان، والطيور البحرية، والأسماك التجارية مثل السلمون، والرنجة، وسمك القُدِّ، والماكريل. وقد وجَد استعراضٌ شامل لحساسية الحيوانات البحرية لتحمُّض المحيطات أن نسبةً كبيرة من ١٥٣ نوعًا مختلفًا من اللافقاريات البحرية والأسماك التي شملتها الدراسة قد أظهرت آثارًا سلبية من نوعٍ ما. يشير هذا إلى أن تحمُّض المحيطات سوف يُحدث تغييراتٍ جوهرية في الأنظمة البيئية للمحيطات خلال هذا القرن، وأن ذلك سيشمل التحولات الدائمة في تركيب الأنواع.

حركة المحيطات

يشهد سطح المحيط العالمي على مستوى الكوكب حركةً في سلسلة من خمسة أنظمة للتيارات، أو الدوَّامات المحيطية الهائلة وشبه الدائرية التي تدفعها الرياح ويبلغ قطر كلٍّ منها آلاف الكيلومترات (انظر شكل ١-٤). تتدفق الدوَّامات المحيطية في نصف الكرة الشمالي في شمال المحيط الهادي وشمال المحيط الأطلنطي في اتجاه عقارب الساعة، وتتدفَّق الدوَّامات المحيطية في نصف الكرة الجنوبي في جنوب المحيط الهادي، وجنوب المحيط الأطلنطي، والمحيط الهندي في عكس اتجاه عقارب الساعة. تنقل هذه الدوَّاماتُ المحيطية كمياتٍ هائلةً من المياه والطاقة الحرارية بين أجزاء حوض المحيط، حاملةً معها عدة أنواع من العوالق.

تُقدم الدوَّامة المحيطية في شمال المحيط الأطلنطي مثالًا جيدًا على المنظومة الحركية لأنظمة الدوَّامات المحيطية. فهنا تدور المياه السطحية حول مركزٍ مستقر يُعرف باسم بحر سارجاسو. تتكون الحافة الغربية المتدفقة نحو الشمال لهذا التيار من تيار الخليج. تيار الخليج هو تيار سطحي سريع الحركة بعرض ٥٠ إلى ٧٥ كيلومترًا، وينقل كمياتٍ هائلةً من مياه البحر الاستوائية الدافئة والمالحة، بسرعات تتراوح من ثلاثة إلى أربعة كيلومترات في الساعة في المتوسط، على طول الحافة الشرقية لقارة أمريكا الشمالية. يغادر هذا التيار الدافئ ساحلَ أمريكا الشمالية عند ساوث كارولاينا تقريبًا، ويعبر شمال الأطلنطي في صورة تيار الأطلنطي الشمالي، مُطلِقًا حرارته في الغلاف الجوي على طول الطريق. تتَّجه الدوَّامة المحيطية بعد ذلك نحو الجنوب، وتنعطف للأسفل على طول الحافة الغربية لأوروبا

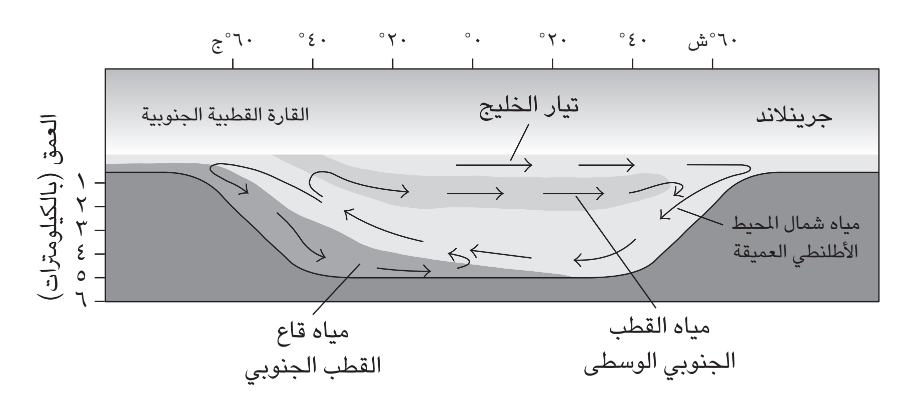


شكل ١-٤: التيارات السطحية الرئيسية في المحيط العالمي.

وأفريقيا حيث تُنتج تيار الكناري الأكثر برودةً، والأوسع نطاقًا، والأبطأ حركةً. ثم ينحني هذا التيار غربًا على طول خط الاستواء ليُشكِّل التيار الاستوائي الشمالي الذي يتدفق إلى منطقة البحر الكاريبي ليُكمِل الدوَّامة المحيطية.

أسفل السطح، تكون كتل المياه العميقة في المحيط العالمي في حالة حركة كذلك. غير أن هذه الحركة ليست من فعلِ الرياح كما هي الحال في التيارات السطحية، وإنما نتيجة تغيُّرات الطفو في مياه البحر التي تحدُث في المحيطَين القطبيَّين. ينتج عن هذا تدفقٌ أضخم يُعرف باسم الدورة الحرارية الملحية؛ نظرًا إلى حدوث تغيرات الطفو نتيجةَ التغيرات في درجة حرارة مياه البحر وملوحتها.

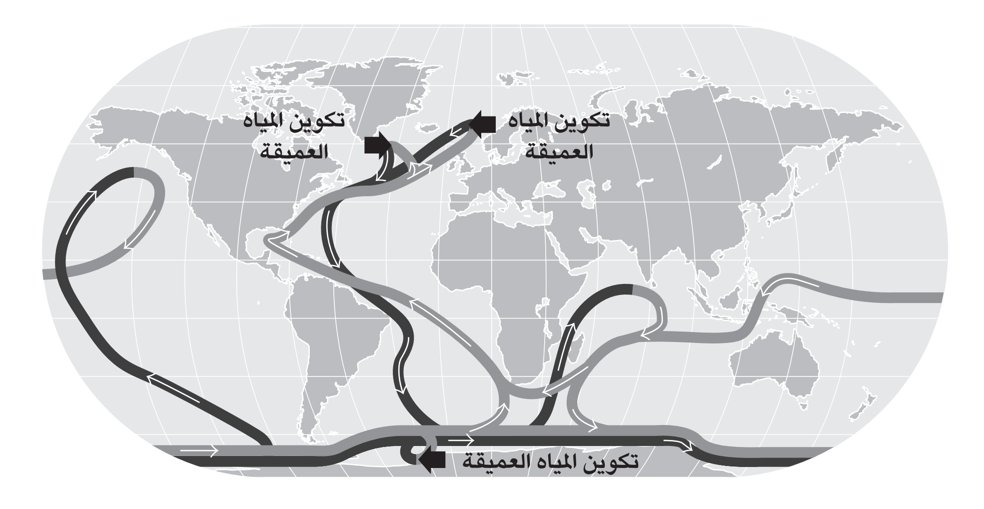
يُمثل المحيط الأطلنطي مثالًا جيدًا على الدورة الحرارية الملحية. ينقل تيار الخليج كمياتٍ كبيرة من مياه البحر الدافئة والمالحة من المناطق المدارية إلى خطوط العرض القطبية في شمال المحيط الأطلنطي. يخضع هنا للتبريد، وتزيد ملوحته بزيادة الملح المنطرح من تجمُّد مياه البحر في القطب الشمالي. تُكوِّن هذه العملية مياه بحر باردة، ومالحة، وكثيفة تغوص سريعًا إلى أعماقٍ كبيرة. تتشكل كميات كبيرة من مياه البحر هذه وتغوص في البحار قبالة جرينلاند، وأيسلندا، والنرويج مُشكِّلةً ما يُسمى بمياه شمال المحيط الأطلنطي العميقة (انظر شكل ١-٥). ومن هناك تتدفَّق هذه الكتلة المائية ببطءٍ نحو الجنوب بالقرب من قاع حوض المحيط الأطلنطي لتتدفَّق لأعلى بعد مئات السنين بالقرب من ساحل القارة القطبية الجنوبية. وبالمثل تتشكل مياه البحر الشديدة البرودة، والملوحة، والكثافة قبالة سواحل القارة القطبية الجنوبية، وتغوص في قاع حوض المحيط الأطلنطي، وتتدفَّق شمالًا أسفل مياه شمال المحيط الأطلنطي العميقة، وتخترق بعيدًا في حوض شمال المحيط الأطلنطي. يُشار إلى هذه الكتلة من المياه باسم مياه قاع القطب الجنوبي. يتشعَّب بعضٌ من مياه شمال المحيط الأطلنطي العميقة المتدفقة لأعلى نحو القارة القطبية الجنوبية، وتنخفض حرارتها، وتلتقي بمياه قاع القطب الجنوبي لتغوصَ مرةً أخرى في الأعماق. ولكنَّ جزءًا آخر من مياه البحر المتدفقة لأعلى هذه يتشعب مبتعدًا عن القارة القطبية الجنوبية، ويتحرك للخلف نحو خطِّ الاستواء حيث يصبح أكثرَ دفئًا وأقلَّ ملوحة نوعًا ما، ويغوص أسفل مياه تيار الخليج مكوِّنًا كتلةً مائية أخرى متوسطة الكثافة تُسمى مياه القطب الجنوبي الوسطى، التي تخترق جيدًا في شمال المحيط الأطلنطي. يُطلق على نظام الدوران في المحيط الأطلنطي هذا مصطلح التيارات التقلبية الجنوبية في المحيط الأطلنطي (AMOC).



شكل ١-٥: مخطَّط مبسَّط للتيارات التقلبية الجنوبية في المحيط الأطلنطي.

للتيَّارات التقلبية الجنوبية في المحيط الأطلنطي دورٌ مهم في نقل الحرارة شمالًا من المناطق الاستوائية، وإطلاقها في الغلاف الجوي فوق شمال المحيط الأطلنطي. وهكذا فإن لها تأثيرًا كبيرًا على أنماط المناخ في نصف الكرة الشمالي. وقد افترض علماء المحيطات أن من شأنِ تغيُّر المناخ الذي يتسبب فيه الإنسان أن يؤثِّر على هذا النظام عن طريق زيادة المياه المنخفضة الملوحة في الشمال القطبي للمحيط الأطلنطي؛ بسبب الزيادة في ذوبان الجليد البحري وصفيحة جرينلاند الجليدية. هذا من شأنه أن يجعل المياه السطحية أكثرَ قابليةً للطفو؛ مما يُقلل من معدَّل غوص مياه البحر، ويُضعِف التيارات التقلبية الجنوبية في المحيط الأطلنطي.

ثمة أدلةٌ متزايدة على احتمالية انتهاء هذا السيناريو. فقد أظهرت الدراسات الحديثة أن معدَّل تدفُّق التيارات التقلُّبية الجنوبية في المحيط الأطلنطي أبطأُ الآن بنسبة ١٥ في المائة عن أي وقت مضى منذ ١٦٠٠ عام. غير أنه لم يتضح بعدُ بشكلٍ جلي إلى أي مدًى يرجع هذا الضَّعف؛ للتقلب الطبيعي في المناخ، أو لتغيُّر المناخ الذي يتسبب فيه الإنسان. من المحتمل أن لكِلتا الآليتَين يدًا في الأمر؛ حيث يعمل الاحترار البشري المَنشأ جنبًا إلى جنب مع التقلب الطبيعي في المناخ على استمرار معدَّلات ذوبان الجليد وإضعاف التيارات التقلبية الجنوبية في المحيط الأطلنطي أو على الزيادة فيها. لذا يلزم الأمرَ مزيدٌ من العمل للتنبؤ بشكلٍ أفضل بحالة التيارات التقلبية الجنوبية في المحيط الأطلنطي على مدى نصف القرن المقبل؛ حيث



شكل ١-٦: عرضٌ مبسَّط لحزام المحيط العظيم الناقل. يُظهر التظليلُ الأغمقُ لونًا التياراتِ العميقةَ الباردة، بينما يُظهر التظليلُ الأفتح التياراتِ الضحلةَ الأكثر دفئًا.

سيؤدي المزيد من إضعافها أو، في أسوأ الأحوال، انهيارِ النظام إلى تغييراتٍ عميقة في أنماط المناخ في جميع أنحاء نصف الكرة الشمالي.

تُعد التيارات التقلبية الجنوبية في المحيط الأطلنطي جزءًا من نظام تيارات محيطي أكبر بكثيرٍ على مستوى الكوكب. كما يقود غوصُ مياه البحر قبالة جرينلاند، وأيسلندا، والنرويج، علاوةً على غوص مياه البحر قبالة القارة القطبية الجنوبية، نظامًا استثنائيًّا لتيارات المحيط العالمي يُعرف باسم حزام المحيط العظيم الناقل. ومثل صفٍّ عملاق لرقصة الكونجا، يتدفق ناقلُ المحيط العظيم عبر المحيطات الأطلنطي، والهندي، والهادي، والجنوبي ويربط فيما بينها. (انظر شكل ١-٦). جملة القول ببساطة، يُحرِّك الناقل المياه المالحة الباردة في هيئةِ تيارٍ عميق من المحيط الأطلنطي إلى المحيط الجنوبي؛ حيث يتدفق بعد ذلك في اتجاه عقارب الساعة حول القارة القطبية الجنوبية، متفرعًا في المحيطَين الهندي والهادي. وترتفع هذه التيارات إلى السطح، دافئةً، وتعود في صورة تيارات سطحية مرةً أخرى عبر المحيط الهادي، والهندي، والأطلنطي إلى نقطةِ بداية نظام الناقل في الشمال القطبي للمحيط الأطلنطي، وهي العملية التي تستغرق نحو ألف عام. يتحرك ناقل المحيط العظيم بسرعاتٍ أبطأ بكثير من التيارات السطحية التي تحرِّكها الرياح — بمعدَّل بضعة

سنتيمترات في الثانية — غير أنه يُحرِّك كمياتٍ هائلة من المياه، تُقدَّر بأكثر من ١٠٠ مرة من تدفُّق المياه في نهر الأمازون. ومن ثَم فهو أقربُ إلى نظام توزيع على مستوى الكوكب، حيث ينقل الأكسجين، والمغذيات، والحرارة في جميع أنحاء محيطات الكوكب ويُلطِّف المناخ العالمي.

الفصل الثاني

العمليات البيولوجية البحرية

تتميز الميكروبات البحرية — وهي كائنات مجهرية وحيدة الخلية — بتنوُّع ووفرة في المحيطات أكثرَ بكثيرٍ مما كان يُظن فيما مضى، وتؤدي أدوارًا رئيسية في إنتاج المواد العضوية والطاقة، وفي تدفقهما وفي تدوير المغذيات في المحيطات. فما يقرُب من نصف الإنتاج الأوَّلي في الكوكب — تخليق المواد العضوية بواسطة الكائنات الحاملة للكلوروفيل باستخدام الطاقة الضوئية من الشمس — يتم داخل المحيط العالمي. توجد الكائنات المنتجة الأولية على اليابسة في أشكال حياة تتميز بالكِبر، والوضوح، وطول العمر النسبي من أشجار، وشجيرات، وعُشب، ومحاصيل غذائية، هي من سِمات المشهد الطبيعي اليابسي. بينما يختلف الوضع تمامًا في المحيطات حيث تكون الكائنات المنتجة الأولية في معظم الأحيان هي الميكروبات من العوالق النباتية العالقة في الطبقة السطحية للمحيطات المضاءة بأشعة الشمس. تُشكِّل هذه الكائنات الحية الدقيقة المُثبِّتة للطاقة — المراعي الخفية في البيئة البحرية — أساسَ الشبكة الغذائية البحرية، وهي شبكة الممرات التي تنتقل عبرها الطاقةُ الغذائية إلى جميع الكائنات الحية الأخرى في النظام البحري؛ بما فيها الميكروبات الأخرى، والعوالق الحيوانية، والأسماك، والثدييات البحرية، والبشر في نهاية المطاف.

محيطٌ من الميكروبات

تتميَّز البيئة البحرية في منطقة البحر المفتوح بوفرةٍ مذهلة في الميكروبات. إذا جمعنا حجمَ جميع الميكروبات في المحيطات، فستصل إلى أكثر من ثلثَي إجمالي الكتلة الحيوية للأحياء البحرية. فالمحيطات بلا شك أشبهُ بوعاءٍ شاسع من حَساء شفاف مليء بالحياة الميكروبية.

بدأت الثورة في فهمنا لأهمية الميكروبات في العمليات البحرية في سبعينيَّات القرن العشرين عندما أدَّى التحسن في الفحص المجهري وتقنيات العد إلى الكشف عن التنوُّع غير المتوقَّع والوفرة الاستثنائية لعالم الميكروبات البحرية، أو ما يُعرف بالميكروبيوم البحري. ومنذ ذلك الحين تقدمَت المعرفة بتركيب الميكروبيوم البحري ووظيفته أكثر بكثير بسبب تكثيف فحص العينات من المحيطات والدمج بين التكنولوجيات الحديثة، التي تشمل: زيادة تحسين التصوير المجهري، والتطوير الحديث في منهجيات الميتاجينوميات التي تُتيح التحليل السريع لجينوماتِ أعدادٍ هائلة من الميكروبات، المأخوذةِ من البيئة الطبيعية عن طريق التحديد السريع لتسلسل مادتها الجينية، علاوةً على الثورة في مجال المعلوماتية الحيوية التي قامت على التقدم في الحوسبة التي تُساعد في تحليل وتفسير الكميات الهائلة من البيانات الميتاجينومية الناشئة.

كان للعديد من بعثات استكشاف المحيطات في القرن الحادي والعشرين، التي تُذكِّرنا برحلات اكتشاف المحيطات الكلاسيكية في القرن التاسع عشر، أدوارٌ رئيسية في أبحاث الميكروبيوم البحري. من هذه البعثات التي كان هدفها استكشافَ المحيط بعثةُ تارا. وتارا هي مركب شراعي بصاريين يبلغ طوله ٣٦ مترًا، وقد جاب محيطات العالم خلال الفترة ما بين عامي ٢٠٠٩ و٢٠١٣، جامعًا أكثرَ من ٣٥ ألف عينة من مياه البحر من السطح وإلى عمقِ ألف متر؛ بهدف إجراء التحليل الميتاجينومي للميكروبات التي تعيش فيها. كشف العمل حتى الآن عمَّا هو بمثابة منجم ذهب من الجينات يقبع في المحيطات، في مخزونٍ يقرُب من ٤٠ مليون جين؛ أي أكثر من ٨٠ في المائة من الجينات التي اكتشفها العلم حديثًا، ما يعكس التنوُّع المذهل للميكروبيوم البحري.

التنوُّع الميكروبي البحري

تعيش في المحيطات أربعُ مجموعات رئيسية من الميكروبات: البكتيريا، والعتائق، والطلائعيات، والفيروسات (انظر شكل ٢-١).

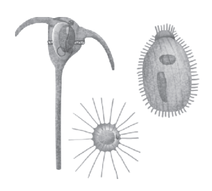
تُشكِّل البكتيريا جزءًا من مجموعة من أشكال الحياة تُعرف ببدائيات النوى، وهي كائنات وحيدة الخلية لا تحتوي على نواة. والبكتيريا البحرية دقيقة الحجم؛ إذ يبلغ قطرها عادةً أقلَّ من ميكرومترين. وقد تكون غيرَ قادرة على الحركة أو تمتلك واحدًا أو أكثرَ من الزوائد الشبيهة بالسَّوط، يُطلق عليها الأسواط، وتُمكِّنها من القدرة على الحركة داخل العالم الدقيق الذي تتغذى، وتنمو، وتتكاثر فيه. كما تتراوح كثافة انتشار البكتيريا



البكتيريا
بدائية النواة: خليتها بلا نواة
أقل من ميكرومترَين من
مليار إلى ١٠ مليارات في
اللتر الواحد من مياه البحر
ذاتية التغذية، أو غيرية التغذية،
أو خلطية التغذية



العتائق
بدائية النواة: خليتها بلا نواة
مماثلة في الحجم والشكل للبكتيريا
ولكنها مختلفة عنها في كيميائها الحيوية
مكون وفير في الميكروبيوم البحري
تستخدم عدة مصادر مختلفة من الطاقة



الطلائعيات
حقيقية النواة: تحتوي خليتها على نواة
من ميكرومتر واحد إلى ٢٠٠ ميكرومتر
من مليون إلى ١٠٠ مليون في اللتر الواحد
من مياه البحر شديدة التنوع في أشكالها
وجيناتها توجد في أشكال ذاتية التغذية،
وغيرية التغذية، وخلطية التغذية، وطفيلية



الفيروسات
من ٠٫٠٢ إلى ٠٫٣ ميكرومتر
من ١٠ مليار إلى ١٠٠ مليار في
اللتر الواحد من مياه البحر تصيب
البكتيريا والعتائق والطلائعيات

شكل ٢-١: التنوُّع الميكروبي البحري.

في مياه البحر من نحو مليار إلى ١٠ مليارات مذهلة في اللتر الواحد. وبسبب حجمها المجهري، لا يزيد وزنُ مليار من البكتيريا البحرية على ٠٫١ مجم، ويحتلُّ مساحةً هزيلة مقدارها ٠٫٠٠٠٠٠٠١ في المائة لكل لتر من مياه البحر. وهكذا، فعلى الرغم من أعدادها المدهشة، تحتل البكتيريا مساحة صغيرة جدًّا في المحيطات.

بعض البكتيريا البحرية ذاتيُّ التغذية؛ إذ تحتوي خلاياها على الكلوروفيل الذي يُمكِّنها من إنتاج طعامها بنفسها عن طريق البناء الضوئي. وبعضها الآخر غيريُّ التغذية، حيث تحصل على التغذية عن طريق امتصاص الجزيئات العضوية الذائبة في مياه البحر (المواد العضوية الذائبة أو DOM) عبر أغشية خلاياها، أو عن طريق الاستعمار وامتصاص الطاقة من الجزيئات الصغيرة للمواد العضوية العالقة في مياه البحر (المواد العضوية الدقائقية أو POM). وبعضها خلطيُّ التغذية؛ أي لديه القدرة على الجمع بين نمطَي التغذية الذاتيِّ والغيري. تتمتع الخلايا البكتيرية البحرية بمعدَّلاتِ أيضٍ عالية للغاية، ويمكنها النموُّ والتكاثر لاجنسيًّا عن طريق الانقسام الخلوي بسرعة كبيرة، غالبًا يوميًّا، وفي بعض الأحيان في غضون ساعات. وبذلك فإن للجماعات البكتيرية القدرةَ على إنتاج جماعة ضخمة من «الإزهار» بسرعة كبيرة في ظل الظروف المواتية.

العتائق، مثلها مثل البكتيريا، هي من بدائيات النوى وتبدو للوهلة الأولى كالبكتيريا في الحجم والشكل، غير أن كيمياءها الحيوية الأساسية مختلفة للغاية. كان أول اكتشاف للعتائق في بيئات قاسية، مثل الينابيع الساخنة والبحيرات الشديدة الملوحة، وعُدَّت في البداية من «محبَّات الظروف القاسية» التي لا توجد سوى في هذه البيئات القاسية. ولكنه أصبح من المعروف الآن توافرُها في العديد من الموائل الأخرى، بما في ذلك منطقة البحر المفتوح للمحيطات؛ حيث تُشكل مكونًا وفيرًا ومتنوعًا من الكتلة الحيوية الميكروبية.

أما الطلائعيات فهي من حقيقيات النوى؛ أي إن خلاياها تحتوي على نواة، غير أنها أحاديةُ الخلية وليست متعددةَ الخلايا كحقيقيات النوى الأخرى. يتراوح حجم الطلائعيات البحرية من نحو ميكرومتر واحد إلى ٢٠٠ ميكرومتر، وتتراوح كثافة انتشارها من مليون إلى ١٠٠ مليون كائن طلائعي لكل لتر من مياه البحر. والطلائعيات هي المجموعة الأكثر تنوعًا من بين الكائنات الحية في المحيطات؛ إذ تشهد تنوُّعًا يفوق بكثيرٍ تنوُّع البكتيريا البحرية والحيوانات البحرية. يشير التحليل الميتاجينومي إلى وجود مئات الآلاف من الأنواع المختلفة من الطلائعيات في المحيطات، معظمها معروف فقط من خلال توقيعه الجيني. على الرغم من كون الطلائعيات البحرية أحاديةَ الخلية؛ فقد طوَّرت مجموعةً رائعة من الأشكال والهياكل الخلوية الفرعية الخاصة. فبعضها له أهدابٌ أو سوطٌ للحركة، وبعضها الآخر أميبي، ولبعضها هياكلُ داخلية، فيما يُكوِّن بعضُها الآخر أصدافًا خارجية، وقد طوَّر العديد منها هياكلَ خاصة لالتقاط الطعام واستشعار البيئة فيما حوله. يمكن أن تكون الطلائعيات البحرية ذاتيةَ التغذية أو غيريةَ التغذية، بينما بعضها خلطيُّ التغذية.

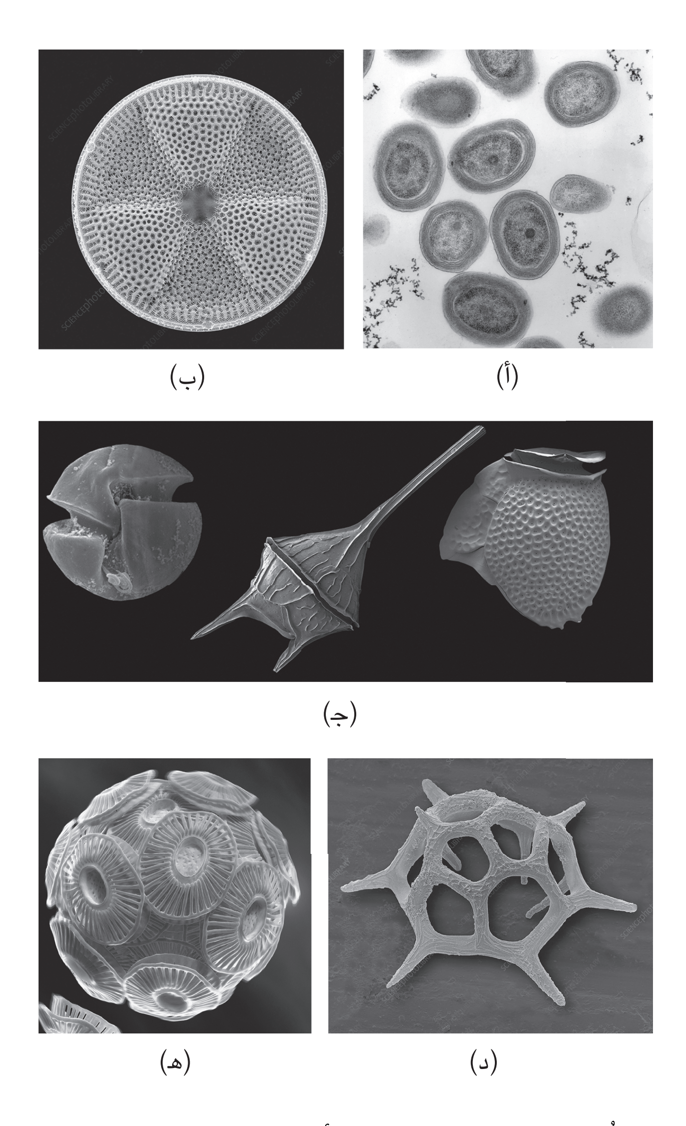
يفترس النوع الغيريُّ التغذية البكتيريا وغيرَها من الطلائعيات، وعادةً ما يُشار إليه بالأوَّليات. كما تعيش بعضُ الطلائعيات كطفيليات أو متكافلات مع كائنات حية أخرى.

تُعد الفيروسات إلى حدٍّ كبير أكثرَ «أشكال الحياة» وفرةً في المحيطات، وتقع على الخط الفاصل بين كونها كيانًا حيًّا وغير حي. هي أصغر بكثير من البكتيريا، بقطر في العادة يتراوح ما بين ٠٫٠٢ و٠٫٣ ميكرومتر وتتراوح كثافةُ انتشارها المذهلة من ١٠ إلى ١٠٠ مليار فيروس في كل لتر من مياه البحر.

يتكون الفيروس من غلافٍ بروتيني يحتفظ بكميةٍ صغيرة من المعلومات الوراثية في صورة أحماض نووية. والفيروسات ليست ذاتيةَ التخلُّق ويجب أن تصيب كائنًا حيًّا عائلًا من أجل البقاء على قيد الحياة والتكاثر. وفي المحيطات، فإن البكتيريا، والعتائق، والطلائعيات عوائلُ يسهُل توافرها. تسمَّى الفيروسات التي تصيب مثل هذه العوائل بالعاثيات، وتتسبَّب الإصابة بالعاثيات في نهاية المطاف في موت خلايا العائل، مطلِقةً أعدادًا كبيرة من النُّسخ المتطابقة من الفيروس الأصلي مع بقايا الخلايا في مياه البحر. ولذلك تُعد عدوى العاثيات من العوامل الرئيسية المسهِمة في وجود مخزون كبير من المواد العضوية الذائبة والمواد العضوية الدقائقية في المحيطات.

تنوُّع العوالق النباتية البحرية

تُعد البكتيريا الذاتية التغذية أحدَ العوالق النباتية البحرية الرئيسية؛ إذ تُسهِم في نسبة ٣٠ إلى ٥٠ في المائة من مجموع الإنتاج البحري الأولي. وتتَّسم إحدى المجموعات، وهي البكتيريا الخضراء المزرقة، بأهمية خاصة في هذا الصدد. يُعد أحد أنواع البكتيريا الخضراء المزرقة، «البروكلوروكوكس»، واحدًا من أصغر (على شكل كرة يبلغ قطرها نحو ٠٫٦ ميكرومتر) الميكروبات التي تقوم بالبناء الضوئي في المحيطات وأكثرها عددًا (انظر شكل ٢-٢(أ)). نظرًا إلى صِغر حجمه، لم يُكتشف هذا الميكروب إلا في ثمانينيَّات القرن العشرين. نعلم الآن بتوفُّره المذهل في الأجزاء الاستوائية وشبه الاستوائية من المحيط العالمي بين خطي عرض ٤٠ درجة شمالًا و٤٠ درجة جنوبًا من السطح وعلى عمق نحو ٢٠٠ متر وبكثافة عددية تزيد على ١٠٠ مليون ميكروب في اللتر الواحد من مياه البحر. وقد قُدِّر أن المحيطات تحتوي على نحو ٣ × ١٠^{٢٧} (أو ثلاثة مليارات مليار مليار) من خلايا «البروكلوروكوكس»، وربما هو ما يجعل هذه البكتيريا الأكثر وفرةً بين الكائنات التي تقوم بالبناء الضوئي على الكوكب والمسئولة عما يقرُب من خمسة في المائة من الإنتاج الأولي العالمي. كشف التسلسل



شكل ٢-٢: تنوُّع العوالق النباتية البحرية: (أ) صورة مجهرية إلكترونية لانتقال خلايا «بروكلوروكوكس» البكتيريا الخضراء المزرقة، (ب) مسح مجهري إلكتروني لأحد طحالب الدياتوم، (جـ) مسح مجهري إلكتروني لبضعة أنواع من السوطيات الدوَّارة، (د) مسح مجهري إلكتروني لهيكل أحد السوطيات السليكونية، (هـ) مسح مجهري إلكتروني لأحد البُذيرات الجيرية.

الجيني عن أن بكتيريا «البروكلوروكوكس» تضم آلاف الأنماط البيئية، وكل نمط بيئي هو سلالة مميزة جينيًّا تكيَّفَت مع بيئةٍ بعينها. على سبيل المثال، تكيَّف أحدُ الأنماط البيئية مع مستويات الإضاءة العالية في المياه الضحلة فيما تكيَّف آخرُ مع مستويات الإضاءة المنخفضة في المياه العميقة.

تُشكِّل الطلائعيات المجموعةَ الرئيسية الأخرى من العوالق النباتية البحرية. وتُعد طحالب الدياتوم أحدَ العناصر المهمة في هذه المجموعة وتوجد بوفرة كبيرة، لا سيما في المياه القطبية ومناطق التيارات المائية المتصاعدة. يبلغ حجم خلاياها عادةً من ١٠ إلى ٢٠٠ ميكرومتر؛ مما يجعلها أكبرَ بكثير من بكتيريا البناء الضوئي. ويحيط بكل خلية دياتوم صندوقٌ زجاجي شفاف منقوش بزخارف ومكوَّن من السيليكا، يُسمى بالمحارة الدياتومية (انظر شكل ٢-٢(ب)). ويمكن للخلايا الفردية لبعض أنواع الدياتوم أن تترابط مُشكِّلةً مستعمرات من سلاسل طويلة.

تُمثل السوطيَّات الدوَّارة والسوطيات السليكونية نوعَين مهمين آخرَين من العوالق النباتية الطلائعية. يتراوح حجم خلاياها من نحو ميكرومترَين إلى ٢٠ ميكرومترًا. لخلايا السوطيات الدوَّارة سوطان كالشعر يمنحانها بعضًا من القدرة المحدودة على الحركة، وغالبًا ما تكون مزوَّدةً بصفائح شفافة من السليلوز (انظر شكل ٢-٢(ج)). بينما تمتلك السوطيات السليكونية سوطًا طويلًا واحدًا وهيكلًا داخليًّا من السيليكا (انظر شكل ٢-٢(د)).

البُذيرات الجيرية هي أيضًا نوعٌ آخرُ مهم من العوالق النباتية الطلائعية. تتراوح أحجام خلاياها بين ٢٠ و٢٠٠ ميكرومتر. وكل خلية مغطاة بصفائحَ صغيرة مزخرفة تُسمى بالصفائح الجيرية، وتتكوَّن من كربونات الكالسيوم (انظر شكل ٢-٢(هـ)).

العوامل المؤثِّرة على الإنتاج البحري الأولي

تستخدم العوالق النباتية أصباغَ الكلوروفيل في خلاياها كي تحصدَ الطاقة من أشعة الشمس التي تخترق المنطقة الضوئية للمحيطات. ومن خلال عملية البناء الضوئي، تُستخدم هذه الطاقة لتركيب المركَّبات العضوية الغنيَّة بالطاقة والتي تحتوي على الكربون، مثل الجلوكوز. يوفِّر ثاني أكسيد الكربون المذاب (CO_2) في مياه البحر مصدر الكربون غير العضوي لهذه العملية. والأكسجين (O_2) هو ناتج ثانوي لعملية البناء الضوئي، ويتم إطلاقه في مياه البحر المحيطة.

يُعد البناء الضوئي عمليةً معقَّدة ومتعددة الخطوات، غير أنه يمكن تلخيصها بالمعادلة المبسَّطة التالية:

$$6CO_2 + 6H_2O \xrightarrow{\text{ضوء الشمس}} C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

مركَّبات
عضوية

المادة العضوية التي تُنتِجها العوالق النباتية هي قاعدة الطاقة، أو المستوى الغذائي الأول، للمحيط العالمي؛ إذ تمثل المصدر الرئيسي للطاقة التي تدعم الحياة في المحيطات. تستهلك الطاقة في المستوى الغذائي الأول مجموعةً متنوعة من الكائنات البحرية في المستوى الغذائي الثاني — المُستهلِكات الأولية أو آكلات العشب — تتناولها تباعًا مُستهلِكاتٌ في مستوياتٍ غذائية أعلى في النظام.

يتناقص معدَّل البناء الضوئي، ومن ثَم الإنتاج الأولي، مع ازدياد العمق في المحيطات؛ بسبب تناقص شدة الضوء. نظرًا إلى أن الطبقات العليا من المحيطات تُمثل بيئةً مضطربةً طبيعيًّا؛ فإن العوالق النباتية تختلط على مختلِف الأعماق داخل عمود الماء حسب قوة الدوران العمودي. كي تنموَ العوالق النباتية وتتكاثر، يجب أن تقضيَ الوقت الكافيَ فوق عمقٍ معين في المنطقة الضوئية، عادةً ما يُشار إليه بمصطلح «العمق الحرج»، لتصبح قادرةً على القيام بعملية البناء الضوئي لطاقةٍ أكبر من تلك المطلوبة لمتطلبات تمثيلها الغذائي الأساسية. وإن لم يحدث ذلك، تُستنشَق جميع الطاقة الناتجة ولا يتبقى شيءٌ منها لنموِّ العوالق. لذلك فإن توافر الضوء وقوة الخلط العمودي هما عاملان مُحدِّدان مهمان في عملية الإنتاج الأولي في المحيطات.

كما يُمثل توافر المغذيات عاملًا مُحدِّدًا آخرَ في عملية نمو الكائنات المنتجة الأولية. أحد تلك المغذيات المهمة هو النيتروجين، الذي تحتاج إليه العوالقُ النباتية في مجموعة متنوعة من وظائف التمثيل الغذائي. على سبيل المثال، النيتروجين مكوِّن رئيسي للأحماض الأمينية، التي تُشكِّل اللبنات الأساسية للبروتينات. تمتص النيتروجين معظمُ الكائنات البحرية التي تقوم بالبناء الضوئي في صورة أمونيوم مذاب (NH_4^+)، أو نيتريت (NO_2^-)، أو نيترات (NO_3^-). وتوفر البكتيريا «المُثبِّتة» للنيتروجين، مثل البكتيريا الخضراء المزرقة «التريكوديزميوم»، مصدرًا لهذه المركَّبات النيتروجينية غير العضوية الأساسية في المحيطات. لهذه البكتيريا قدرةٌ خاصة على تحويل أو «تثبيت» النيتروجين

الجزيئي (N_2) المذاب في مياه البحر إلى الأمونيا (NH_3)، والتي تستخدمها خلاياها بعد ذلك لتخليق مركَّباتٍ عضوية غنية بالنيتروجين مثل البروتينات. عند موت البكتيريا المُثبِّتة للنيتروجين، تُطلَق هذه المركَّبات العضوية في مياه البحر حيث تُحلِّلها أنواعٌ أخرى من البكتيريا وتعيد تدويرها مرةً أخرى إلى أشكالٍ غير عضوية من النيتروجين، حيث تُتاح بعد ذلك للكائنات المنتِجة الأولية الأخرى.

تحتاج الكائنات البحرية التي تقوم بالبناء الضوئي أيضًا إلى الفوسفور اللازم للعديد من الوظائف البيولوجية المهمة، بما في ذلك تخليق الأحماض النووية، وهي مكوِّنٌ رئيسي للحمض النووي DNA. يأتي الفسفور في المحيطات طبيعيًّا من تآكل الصخور والتربة على اليابسة وينتقل إلى المحيطات عن طريق الأنهار، الكثير منه في صورة فوسفات مذاب (PO_4^{3-})؛ حيث يمكن للكائنات الحية البحرية التي تقوم بالبناء الضوئي امتصاصُه بسهولة.

يتوافر النيتروجين غير العضوي ومركَّبات الفوسفور بشكلٍ أكبر في أعماق المحيطات حيث تُحلل البكتيريا وتعيد تدوير وابلٍ من المواد العضوية الميتة الغاطسة من المياه السطحية إلى أشكالٍ غير عضوية من النيتروجين والفوسفور. عندما تكون الطبقة العليا من المحيط مختلطةً جيدًا، أو غيرَ طبقية، تختلط هذه المياه العميقة الغنية بالمغذيات في الطبقة المضاءة، موفرةً إمدادًا وفيرًا من العناصر الغذائية للسطح. ولكن في حالة وجود طبقة التغيُّر الحراري، فإنها تعمل حاجزًا لتجدد المغذيات من مياه المحيطات العميقة أسفلها. في ظل هذه الظروف، وفي حالة غياب عمل مستويات الضوء كعامل مُحدِّد، ستعمل الكائنات الحية التي تقوم بالبناء الضوئي على الاستنفاد السريع للمغذيات من الطبقة السطحية فوق طبقة التغيُّر الحراري. في الواقع لا تُستنفَد مركَّبات النيتروجين والفوسفور غير العضوية بمعدَّلاتٍ متساوية. ومن ثَم سينضب أحدها قبل الآخر ويُصبح العامل المغذي المُحدِّد عندئذٍ، مما يحول دون مواصلة عمليات البناء الضوئي والنمو للكائنات المنتجة الأولية البحرية حتى يُعاد الإمدادُ به. يُعد النيتروجين بوجهٍ عام العاملَ المغذيَ المُحدِّد للمعدَّلات في معظم البيئات المحيطية، لا سيما في المحيط المفتوح.

تحتاج الكائنات المنتجة الأولية البحرية أيضًا إلى المُغذِّيات الصغرى من الحديد، الذي يُستخدم في مجموعة متنوعة من عمليات التمثيل الغذائي الضرورية للبناء الضوئي والنمو. يُستمد الحديد في المحيطات من غبارٍ غني بالحديد يأتي من الصحاري أثناء العواصف الترابية ويتناثر بعيدًا في المحيطات. كما تمثل رواسب الحديد على حافات القارات مصدرًا آخر له. هناك تركيزاتٌ كافية من الحديد المذاب في معظم أجزاء المحيط

العالمي؛ لذلك فهو لا يُشكِّل عادةً عاملًا مُحدِّدًا للإنتاج البحري الأولي. إلا أن تركيزات الحديد المذاب في بعض مناطق المحيط المفتوح، مثل المناطق الاستوائية وشمال المحيط الهادي وأجزاء كبيرة من المحيط الجنوبي، منخفضةٌ لدرجة تجعل الحديد العامل المُحدِّدَ لمعدَّلات الإنتاج الأوَّلي على الرغم من وجود نسبٍ عالية من النيتروجين والفوسفور. يُشار إلى هذه المناطق باسم المناطق الغنية بالمغذيات الفقيرة في الكلوروفيل (HNLC)؛ حيث تعكس تركيزات الكلوروفيل المنخفضة نُدرة الكائنات الحية التي تحتوي على الكلوروفيل في مياه البحر.

اقترح بعضُ الباحثين أن التخصيب الاصطناعي بالحديد للمناطق الغنية بالمغذيات الفقيرة في الكلوروفيل بهدف بدءِ الإنتاج الأولي في تلك المناطق الغنية بالمغذيات الأخرى من شأنه أن يكون إحدى طرقِ التخفيف من تغيُّر المناخ. الفكرة في ذلك هي أن إزهار العوالق النباتية الناتج سيسحب كمياتٍ كبيرةً من ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي. وعندما تموت العوالق النباتية، ستغوص في أعماق المحيط حيث من المحتمل أن يُحبَس الكربون في أنسجتها في رواسبَ بحرية، وذلك إذا وصلَت إلى أرضية المحيط. بعبارة أخرى، في حالة إجراء الأمر على نطاقٍ واسع بما يكفي، فقد يُعزز إزهارُ العوالق النباتية الناتج اصطناعيًّا هذا من «ضخ» العوالق النباتية النامية طبيعيًّا لثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي إلى داخل المحيط وربما إلى تخزينٍ طويل الأجل في رواسب أعماق المحيط. وقد وضعَت بعض الشركات في الواقع خططًا لتحويل النظرية إلى واقع عملي، واقترحَت إجراء تخصيب المحيطات بالحديد على نطاق واسع وكسب الدخل من إنشاء أرصدة الكربون وبيعها في أسواق تداول الكربون العالمية.

أُجريت أكثرُ من ١٢ تجرِبةً صغيرة النطاق (على نحو ١٠٠ كيلومتر مربع) تضمَّنَت تخصيبَ رقعٍ من المحيط المفتوح بنحو طنٍّ من الحديد المذاب المتناثر من السُّفن الخاصة بالأبحاث، وقد أظهرت إمكانيةَ تحفيزِ الإنتاج الأولي بهذه الطريقة على مدى أوقاتٍ تمتدُّ من بضعة أيام إلى أسابيع. غير أنه من غير المؤكَّد على الإطلاق إن كان ذلك سيصبح في وقتٍ من الأوقات طريقةً عملية من طرق «الهندسة الجيولوجية» للتخلص من ثاني أكسيد الكربون على نطاقٍ واسع في الغلاف الجوي أم لا. وكي تعمل هذه الطريقة بشكل جيد وتحبس كميات كبيرة من الكربون في الرواسب البحرية؛ فإن العملية يجب أن تُحفز النوع الصحيح من إزهار العوالق النباتية؛ أي خلايا الدياتوم الكبيرة التي تقاوم رعي الكائنات الحية عليها في المستوى الغذائي الثاني، والتي تغوص سريعًا في أرضية البحر.

فإن لم يحدُث ذلك، فستستهلك العوالق الحيوانية الكائنات المنتجة الأولية سريعًا ويرجع الكربون المنطلق في صورة ثاني أكسيد الكربون مرةً أخرى إلى المياه السطحية. أظهرت التجارب حتى الآن أنه من الصعب للغاية التأكدُ من كمية الكربون، في حالة وجوده، التي تُنقل إلى أرضية المحيط وما إذا كانت العملية ستُحدِث فرقًا فعليًّا في حال تطبيقها على نطاق واسع. والأكثر أهمية أنه لا يمكن لأحد التنبؤ بالآثار الضارَّة التي قد تلحق بالنظام البيولوجي البحري الأكبر من جراء تخصيب المحيطات بالحديد على نطاق صناعي. ولكن يكاد يكون من المؤكد أن ثمة تغييرًا سيلحق بتكوين مجتمعات العوالق النباتية وتطوُّرها على نطاقٍ واسع ويؤثر على الشبكات الغذائية البحرية بطرق غير مقصودة. وقد وافق بالفعل أطرافُ اتفاقية الأمم المتحدة بشأن التنوُّع البيولوجي في عام ٢٠٠٨ على وقف جميع مشروعات التخصيب الاصطناعي للمحيطات باستثناء المشروعات الصغيرة في المياه الساحلية. ومن ثَم على الرغم من أن البحث في مجال التخصيب بالحديد يُعزِّز فهمنا بعمليات الإنتاج الأولية في المحيطات؛ فمن غير المحتمل أن يُسفر عن تقنيةٍ قابلة للتطبيق وآمنةٍ يمكن استخدامها للمساعدة في الحدِّ من تغير المناخ، الذي يتسبَّب فيه الإنسانُ بالحد الأدنى من المخاطر.

قياس الإنتاجية البحرية الأولية

يشهد معدَّل الإنتاج الأولي — المصطلح عليه بالإنتاجية الأولية — تباينًا كبيرًا باختلاف المكان والزمان في المحيط العالمي. عادةً ما توصف الإنتاجيةُ الأولية بعدد جرامات الكربون (C) «الثابت»، أو المتضمَّن في مادةٍ عضوية، لكل متر مربع من سطح المحيط في السنة ($g\ C\ m^{-2}\ yr^{-1}$). وما لم يُذكر خلاف ذلك، فإن تقديرات الإنتاجية الأولية تشير إلى صافي الإنتاجية الأولية. يُشكل هذا الرقم أهميةً لدى علماء الأحياء البحرية؛ لأنه مقياسٌ لنسبة الكربون الثابت الذي يُستخدم لنموِّ العوالق النباتية والذي يصبح بذلك متوفرًا لمستويات غذائية أعلى. وهو يستثني الكربون الثابت الخارج من عملية التنفس في صورة ثاني أكسيد الكربون للحفاظ على الوظائف الخلوية؛ ومن ثَم يفتقده المستوى الغذائي التالي.

يُعد قياس الإنتاجية الأولية في المحيطات عملًا مليئًا بالتحديات. يمكن إجراؤه عن طريق وضع عيناتٍ من مياه البحر في زجاجات، وتعريضها للضوء، وقياس مقدار الأكسجين الذي تُطلقه الكائنات الحية البحرية التي تقوم بالبناء الضوئي في الزجاجات.

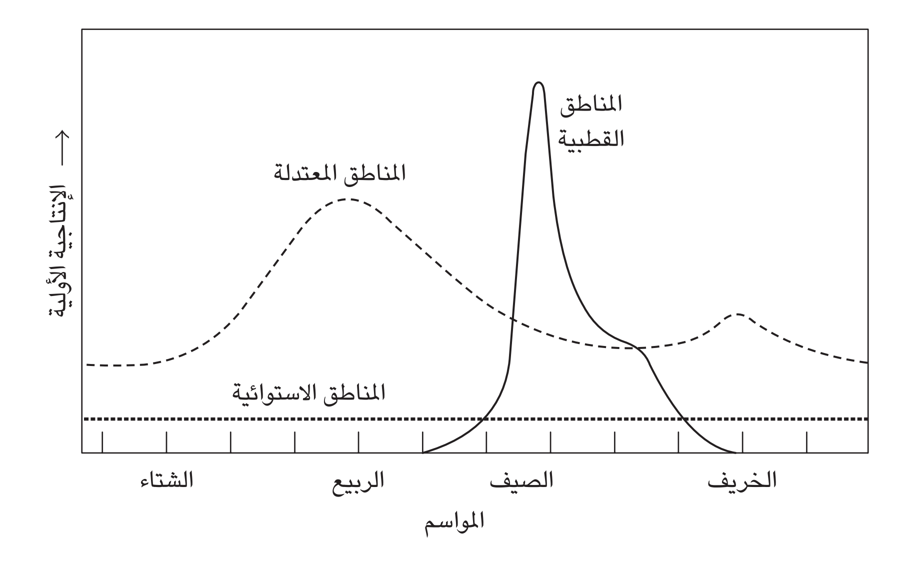
يمكن تحويل هذا إلى تقديرات لكمية الكربون المُثبَّتة في مادة عضوية؛ لأن عدد جزيئات الأكسجين الناتجة يُعادل تقريبًا عددَ جزيئات ثاني أكسيد الكربون المُثبَّتة في المادة العضوية (انظر معادلة البناء الضوئي السابق ذكرها). من الطرق الأخرى القياس المباشر بقدرٍ أكبر لكمية الكربون المتضمَّنة في العوالق النباتية في الزجاجات باستخدام الكربون المشع ١٤ بوصفه مُتتبِّعًا. باستخدام هذه الأساليب، يمكن الحصول على تقديرات الإنتاجية الأولية في رقعةٍ من المحيط في وقت معين.

تكمُن مشكلة تقنيات القياس «الموقعي» هذه في أنها لا يمكنها أن توفِّر تقديرات للإنتاجية الأولية إلا لعدد صغير من المواقع في وقت واحد محدَّد، وذلك حتى باستخدام الأنظمة التي تأخذ أكثر العينات تكثيفًا. لذلك من الصعب تكوينُ صورة عالمية وتواكب التغيُّرات في الإنتاجية الأولية باستخدام هذه الأساليب. إلا أن ذلك قد تغيَّر عندما بدأ رصدُ الأقمار الصناعية للون أسطح المحيطات منذ عام ١٩٧٨ مع إطلاق القمر الصناعي «نيمبوس ٧». حمل هذا القمر الصناعي أداةً تُسمى ماسح لون المنطقة الساحلية، يقيس الأطوالَ الموجية للضوء المنعكس من سطح المحيط؛ بشكلٍ أساسي كلما كان سطح المحيط أكثر خُضرةً، كان تركيز الكلوروفيل فيه أكثر، ومن ثَم كانت أعداد الكائنات الحية التي تقوم بالبناء الضوئي فيه أكثر. تُستخدم الآن بشكل روتيني أجهزةُ استشعار محمولة عبر الأقمار الصناعية أكثر تقدمًا لتقدير تركيزات الكلوروفيل، ومن ثَم الإنتاجية الأولية، على مساحات شاسعة للغاية من المحيط العالمي. وقد وفرَت القياسات المتكررة المرسلة من الأقمار الصناعية للمحيط العالمي بأكمله على مدار الأيام، والأسابيع، والسنوات، إلى جانب القياسات «الموقعية» المباشرة؛ فَهمًا شاملًا بقدرٍ كبير من التحسين للأنماط المكانية والزمانية للإنتاجية الأولية العالمية.

الأنماط العالمية للإنتاجية البحرية الأولية

يعتمد النمط العام للإنتاجية الأولية في المحيط العالمي اعتمادًا كبيرًا على خطوط العرض (انظر شكل ٢-٣). ففي المحيطين القطبيين يوجد الإنتاج الأوَّلي في حالة متذبذبةٍ ما بين الازدهار والكساد تبعًا لتوافر الضوء. تختلط المحيطات في هذه المناطق جيدًا على مدار العام؛ لذلك نادرًا ما تكون العناصر الغذائية محدودة. ولكن الضوء يغيب خلال الشتاء القطبي، ومن ثَم لا يوجد إنتاجٌ أولي. أما في الربيع، فيشهد كلٌّ من مستويات الضوء وطول النهار زيادةً سريعة، وتصل تلك المناطق إلى وقتٍ في العام يصبح فيه كلٌّ من

العناصر الغذائية والضوء معًا غيرَ محدودَين، وتبدأ العوالق النباتية في الإزهار بكثافة. قد يستمر هذا عدةَ أشهر حتى يصبح الضوء محدودًا مرةً أخرى في الخريف. وعلى الرغم من اقتصار الإنتاج الأولي على موجةٍ موسمية قصيرة؛ فإن كميته الإجمالية من شأنها أن تكون مرتفعة للغاية، ولا سيما في المحيط الجنوبي القطبي حيث يمكن أن تصل الإنتاجية السنوية في حدود ١٠٠ جرام من الكربون لكل متر مربع من سطح المحيط، بل وأكثر في بعض المناطق.



شكل ٢-٣: تصويرٌ للاختلاف الموسمي في الإنتاجية الأولية في المحيطات القطبية، والمعتدلة، والاستوائية.

في مناطق المحيطات المفتوحة المعتدلة، ترتبط الإنتاجية الأولية ارتباطًا وثيقًا بالأحداث الموسمية. ففي الشتاء، يبرد سطح المحيط وتنهار طبقة التغيُّر الحراري بفضل الرياح القوية التي تخلط طبقاتِ السطح. يسمح هذا بخلط المياه السطحية جيدًا بمياه البحر الأكثر عمقًا الغنية بالمغذِّيات. غير أن مستويات الضوء منخفضةٌ في الشتاء وتحدُّ من الإنتاجية الأولية. وفي الربيع، حيث يطول النهار وترتفع الشمس أكثرَ في السماء، ثَمة وقتٌ يصبح فيه كلٌّ من الضوء والمغذيات غير محدود ويُحفَّز إزهار العوالق النباتية

الربيعية. أما في الصيف، فعلى الرغم من توفُّر الضوء، يُعاد تكوُّن طبقة التغيُّر الحراري حيث تزداد المياه السطحية دفئًا، مما يحول بين الطبقة المضاءة والمياه العميقة الغنية بالمغذيات. تصبح المغذيات في ذلك الوقت محدودة و«ينهار» إزهار الربيع. في الخريف، تنهار طبقة التغيُّر الحراري مرةً أخرى، ويتجدَّد تكوُّن المغذيات في الطبقة المضاءة. إذا حدث هذا مبكرًا بما يكفي في الخريف، حيث لا يزال القدْر الكافي من ضوء الشمس متوفرًا، فسيصبح كلٌّ من المغذيات والضوء غير محدود مدةً قصيرة من الوقت، وقد يحدث إزهار العوالق النباتية في الخريف. سيستمر هذا الإزهار حتى يصبح الضوءُ عاملًا مُحدِّدًا مرةً أخرى في أواخر الخريف والشتاء. على الرغم من اعتماد الإنتاجية الأولية على المواسم بشكلٍ كبير، فإن إجمالياتها في المحيطات المعتدلة تصل إلى معدَّلٍ يتراوح تقريبًا بين ٧٠ و١٢٠ جرامًا من الكربون لكل متر مربع من سطح المحيط في السنة وهي مستويات مماثلة لتلك التي في الغابات المعتدلة أو الأراضي العشبية.

في المحيطات الاستوائية المفتوحة، تكون الإنتاجية الأولية منخفضة طوال العام. لا يكون الضوء في هذه المناطق عاملًا مُحدِّدًا على الإطلاق، غير أن طبقة التغيُّر الحراري الاستوائية تعيق خلط مياه البحر العميقة الغنية بالمغذيات بالمياه السطحية. ومن ثَم توجد المغذيات في مستويات منخفضة دائمًا في الطبقة المضاءة، مما يحدُّ من الإنتاجية الأولية. لذلك، عادةً ما يُشار إلى المياه الاستوائية المفتوحة باسم «الصحاري البحرية»، حيث لا تتعدى إنتاجيتها بشكل عامٍّ ٣٠ جرامًا من الكربون لكل متر مربع من سطح المحيط في السنة تقريبًا، وهو ما يُضاهي إنتاجية إحدى الصحاري البرية.

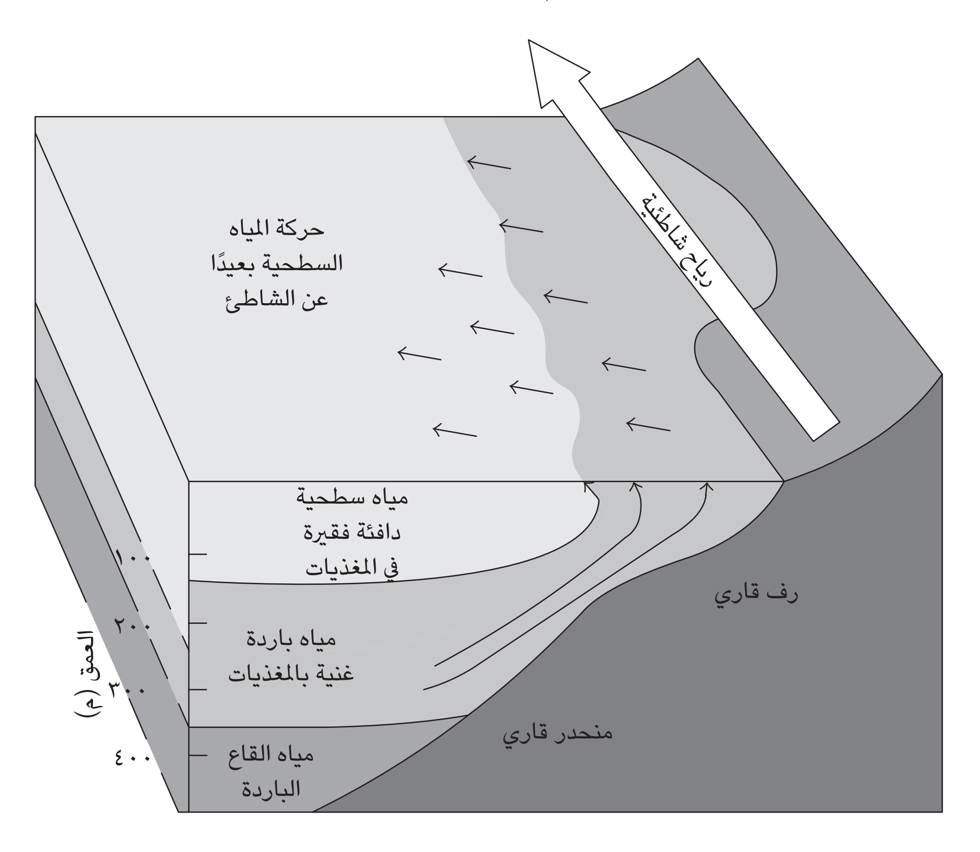
توجد بعض البيئات البحرية الأكثر إنتاجية في المحيط الساحلي فوق الرفوف القارية. وهذا نتيجة لظاهرةٍ تُعرف باسم التيار الصاعد الساحلي، الذي يجلب مياه البحر العميقة والباردة والغنية بالمغذيات إلى سطح المحيط، مُشكِّلًا ظروفًا مثالية للإنتاجية الأولية التي يمكن أن تزيد على ٥٠٠ جرام من الكربون لكل متر مربع من سطح المحيط في السنة، لتُضاهي بذلك إنتاجيةَ الغابات المطيرة البرية أو الأراضي الزراعية المزروعة. هذه النقاط الساخنة للإنتاجية البحرية تكونها الرياح التي تهب بالتناغم مع دوران الكوكب.

يمكن تفسير الظاهرة بمصطلحات أساسية على النحو التالي. عندما تهبُّ رياح منتظمة على سطح المحيط، فإنها تجعل الطبقة السطحية تتحرك في اتجاهها. وهذه الطبقة العُليا من مياه البحر المتحرِّكة ستُحرِّك بدورها طبقةً أسفلها من مياه البحر، ولكن بحركةٍ أبطأ قليلًا من حركة الطبقة التي تعلوها، وهكذا على طول عمود الماء حتى

تتحول طاقة الرياح بالكامل إلى مياه متحركة. إلا أنه بسبب دوران الكوكب، وهو ما يكوِّن ظاهرةً تُعرف باسم تأثير كوريوليس، فإن كلًّا من هذه الطبقات المتحركة من مياه البحر تتجعَّد قليلًا إلى اليمين في نصف الكرة الشمالي، وإلى اليسار في نصف الكرة الجنوبي. يُكوِّن هذا نمطًا دوَّاميًّا مميزًا لحركة المياه في عمود الماء يُسمى دوامة إيكمان. النتيجة النهائية لدوامة إيكمان هي أن متوسط اتجاه تدفُّق مياه البحر التي تحرِّكها الرياح يكون تقريبًا قائمَ الزوايا في اتجاه الرياح السطحية، على يمين اتجاه الرياح في نصف الكرة الشمالي، وإلى اليسار في نصف الكرة الأرضية الجنوبي. وتُعرف هذه الحركة الصافية للمياه إلى يمين أو يسار اتجاه الرياح باسم نقل إيكمان.

يمكن أن يهبَّ التيار الصاعد الساحلي عندما تتحرك الرياح السائدة في اتجاهٍ مُوازٍ تقريبًا لخطٍّ ساحلي، مُكوِّنةً ظاهرةَ نقل إيكمان بعيدًا عن الشاطئ. وينتشر التيار الصاعد الساحلي على وجه الخصوص على طول السواحل الغربية للقارات. في نصف الكرة الجنوبي، عندما تهبُّ رياحٌ منتظمة تقريبًا من الجنوب على طول الحافة الغربية لإحدى القارات، تكون الحركة الصافية لأعلى ١٠٠ متر أو نحو ذلك من مياه البحر في المتوسط في اتجاه الغرب بعيدًا عن الساحل بسبب نقل إيكمان (انظر شكل ٢-٤). يمكن أن تحلَّ محلَّ هذه الكتلة من مياه البحر المُزاحة مياهُ بحر من الأسفل سُحِبَت إلى السطح. إذا كان التيار الصاعد قادمًا من مياه أسفل عمق طبقة التغيُّر الحراري، فستكون مياه البحر التي حلت محلَّ الكتلة المُزاحة هذه باردةً وغنية بالمغذيات. وبالمثل، في نصف الكرة الشمالي، عندما تهبُّ رياحٌ منتظمة من الشمال تقريبًا على طول الحافة الغربية لإحدى القارات، فإن الطبقة السطحية لمياه البحر تتحرك في المتوسط إلى الغرب بعيدًا عن الشاطئ، مما يُكوِّن حالات من التيار الصاعد الساحلي. ونظرًا إلى اعتماد التيار الصاعد الساحلي على الرياح المواتية، فإنه يُعد ظاهرةً موسمية أو عرَضية، وتعتمد قوة التيار على اتجاه الرياح وقوَّتها.

من مناطق التيار الصاعد الساحلي المهمة حول العالم سواحل كاليفورنيا، وأوريجون، وشمال غرب أفريقيا، وغرب الهند في نصف الكرة الشمالي، وسواحل تشيلي، وبيرو، وجنوب غرب أفريقيا في نصف الكرة الجنوبي. هذه المناطق هي من بينِ أكثرِ النُّظم البيئية البحرية إنتاجيةً على الكوكب. عندما يهب التيار الصاعد، تُحفِّز مياه البحر الباردة والغنية بالمغذيات الإزهارَ الهائل للعوالق النباتية، وخاصة الأنواع الأكبر منها مثل طحالب الدياتوم والأنواع الكبيرة من السوطيات الدوَّارة.



شكل ٢-٤: تصويرٌ للتيار الصاعد الساحلي على طول الساحل الغربي لإحدى القارات في نصف الكرة الجنوبي جالبًا مياه البحر الغنية بالمغذيات إلى السطح.

ظاهرة النينيو/التقلبات الجنوبية

يدعم التيارُ الصاعد قبالة الساحل الغربي لأمريكا الجنوبية؛ أحدَ أكثر مصايد الأسماك إنتاجيةً على هذا الكوكب، وهي مصايد البَلَم المُفغَّر. لطالما كان صيادو بيرو على درايةٍ بظاهرة أطلقوا عليها اسم النينيو (أي الطفل)؛ تكريمًا للطفل المسيح؛ لأنها غالبًا ما تحدُث في وقتٍ قريب من عيد الميلاد المجيد. خلال ظاهرة النينيو، تصبح المياه السطحية دافئةً بدرجة غير معتادة وتموت الأسماك والطيور البحرية، وتتضاءل مصايد البَلَم أو تختفي، كما تختفي الحيتان، والدلافين، والفقمات.

نعلم الآن أن هذا جزءٌ من ظاهرةٍ عالمية مهمة وغير مفهومة جيدًا تُسمى ظاهرة النينيو/التقلبات الجنوبية (ENSO). ترتبط ظاهرة النينيو بالانعكاسات الدورية للضغط الجوي في المحيط الهادي. هناك عادةً نظامُ ضغطٍ عالٍ مستمر في شرق المحيط الهادي، ونظامُ ضغطٍ منخفض مستمر في غرب المحيط الهادي. في ظل هذه الظروف تهبُّ رياح المحيط الهادي التجارية بقوة من الشرق إلى الغرب، مُحرِّكةً مياهَ البحر السطحية باتجاه الغرب، ومُكوِّنةً نظامَ تيار صاعد ساحلي يدعم مصايد البَلَم المُفغَّر. غير أنه خلال ظاهرة النينيو، ينعكس نظام الضغط هذا لسببٍ غير معلوم. يؤدي هذا إلى تقلص الرياح التجارية، مما يسمح بحركة المياه الدافئة من غرب المحيط الهادي شرقًا وتراكمها على طول ساحل أمريكا الجنوبية، وهو ما يُضعف نظام التيار الصاعد الذي يدعم مصايد البَلَم. من دون البَلَم، تموت الطيور البحرية وتغادر الثدييات البحرية، التي تتغذَّى عادةً على البَلَم، مناطقَ تغذيتها المعتادة. تحدث ظاهرة النينيو كلَّ سنتين إلى سبع سنوات تقريبًا، وتنتهي عادةً في أقلَّ من عام، غير أن ظاهرة النينيو الشديدة يمكن أن تستمر عدة سنوات.

سُجِّل أكثرُ من ٢٠ حدثًا لظاهرة النينيو منذ أوائل خمسينيَّات القرن العشرين، وهناك أدلةٌ على أن شدة هذه الأحداث قد زاد في السنوات الأخيرة. خلال هذه المدة، وقعَت أشدُّ أحداث لظاهرة النينيو في الأعوام من ١٩٨٢ إلى ١٩٨٣، ومن ١٩٩٧ إلى ١٩٩٨، ومن ٢٠١٤ إلى ٢٠١٦، ومن ٢٠١٨ إلى ٢٠١٩. تمسُّ تأثيرات ظاهرة النينيو القوية جميعَ أنحاء العالم. فمن شأن ولاية كاليفورنيا وغرب أمريكا الجنوبية أن يشهدا عادةً أمطارًا غزيرة، بينما يمكن أن تشهد أجزاءٌ من أستراليا، وإندونيسيا، وأفريقيا جفافًا شديدًا. تُعد الفيضانات، وتلَفُ المحاصيل، والانهيارات الأرضية وغيرها من الأحداث المرتبطة بأنماط طقس ظاهرة النينيو؛ مكلفةً للغاية؛ إذ تتسبَّب في أضرارٍ جسيمة وفي العديد من الوفَيَات.

حركة الطاقة عبر الشبكة الغذائية البحرية

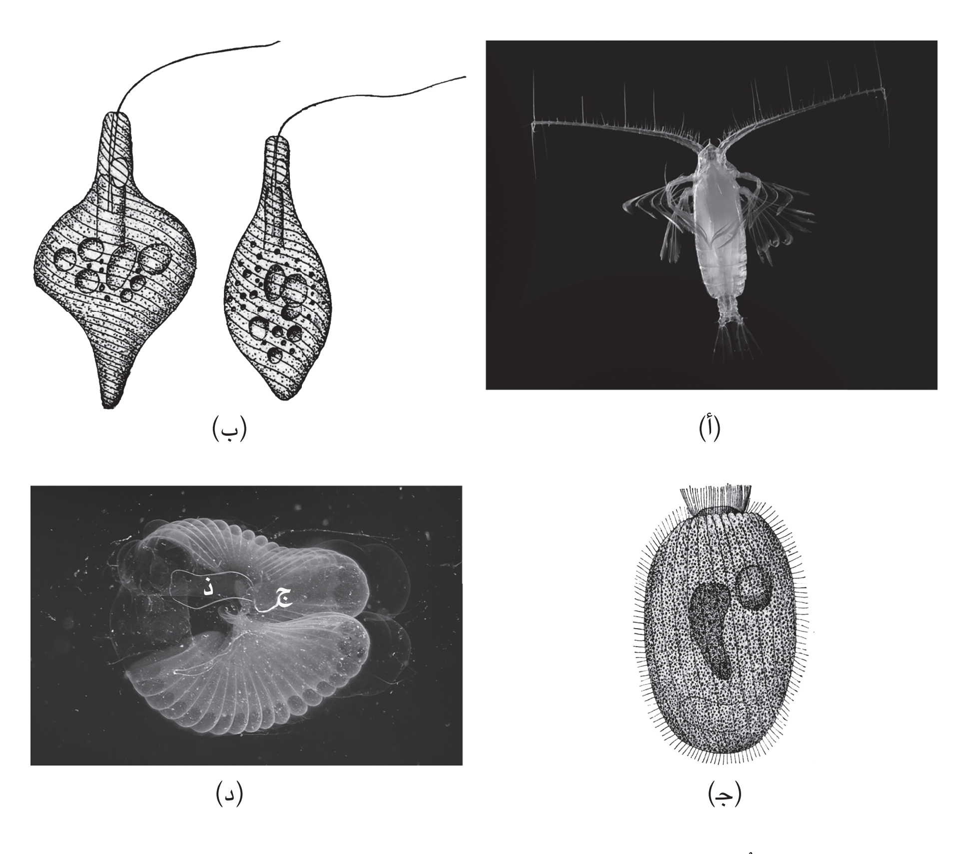
كما ناقشنا في هذا الفصل، فإن ميكروبات العوالق النباتية العالقة في الطبقة المضاءة مسئولة عن الإنتاج الأولي بأكمله تقريبًا في المحيطات. ولكن ما المسارات المختلفة التي تنتقل من خلالها هذه الطاقة الغذائية عبر الشبكة الغذائية البحرية؟ وما مستويات كفاءتها؟ على مدى العقود الأربعة الماضية حقَّق علماء الأحياء البحرية تقدمًا كبيرًا في الإجابة عن هذه الأسئلة.

حتى سبعينيَّات القرن العشرين كان يُعتقد أن معظم الإنتاج الأولي في المحيطات ينتقل عبر سلسلةٍ غذائية بسيطة تتألف من عددٍ صغير من «المستويات الغذائية»؛ أي المستوى الذي تستمدُّ منها الأنواع طعامَها في الشبكة الغذائية. حسب هذه الرؤية «الكلاسيكية»، فإن الكائنات المنتجة الأولية في المستوى الغذائي الأول هي في المقام الأول طحالب الدياتوم والسوطيات الدوَّارة الكبيرة، التي تأكلها العوالق الحيوانية الكبيرة، خاصةً مجذافيات الأرجل، في المستوى الغذائي الثاني (انظر شكل ٢-٥(أ)). وهذه بدورها تأكلها الأسماك الصغيرة في المستوى الغذائي الثالث، التي تُمثل غذاءً للمفترسات العُليا مثل الحبَّار، والأسماك الكبيرة، والثدييات البحرية في المستوى الغذائي الرابع. في عالم اليوم الذي يُهيمن عليه الإنسان، يحصد العديد من هذه المفترسات البحرية المفترس الأعلى على الإطلاق، وهو الإنسان، في المستوى الغذائي الخامس (انظر الفصل الثامن).

عندما بدأ علماء الأحياء البحرية في فهم أهمية الميكروبات في اقتصاد المحيطات، أصبح من الواضح أن هذا المفهوم للسلسلة الغذائية الكلاسيكية كان في كثيرٍ من الحالات شديدَ البساطة، ولا يُعبر عن الصورة الكاملة لكيفية انتقال الطاقة عبر النظام البيئي البحري. ومن ثَم نشأت نماذجُ جديدة لهيكل الشبكة الغذائية والتي لا تزال قيد الدراسة والتنقيح من قِبل علماء الأحياء البحرية.

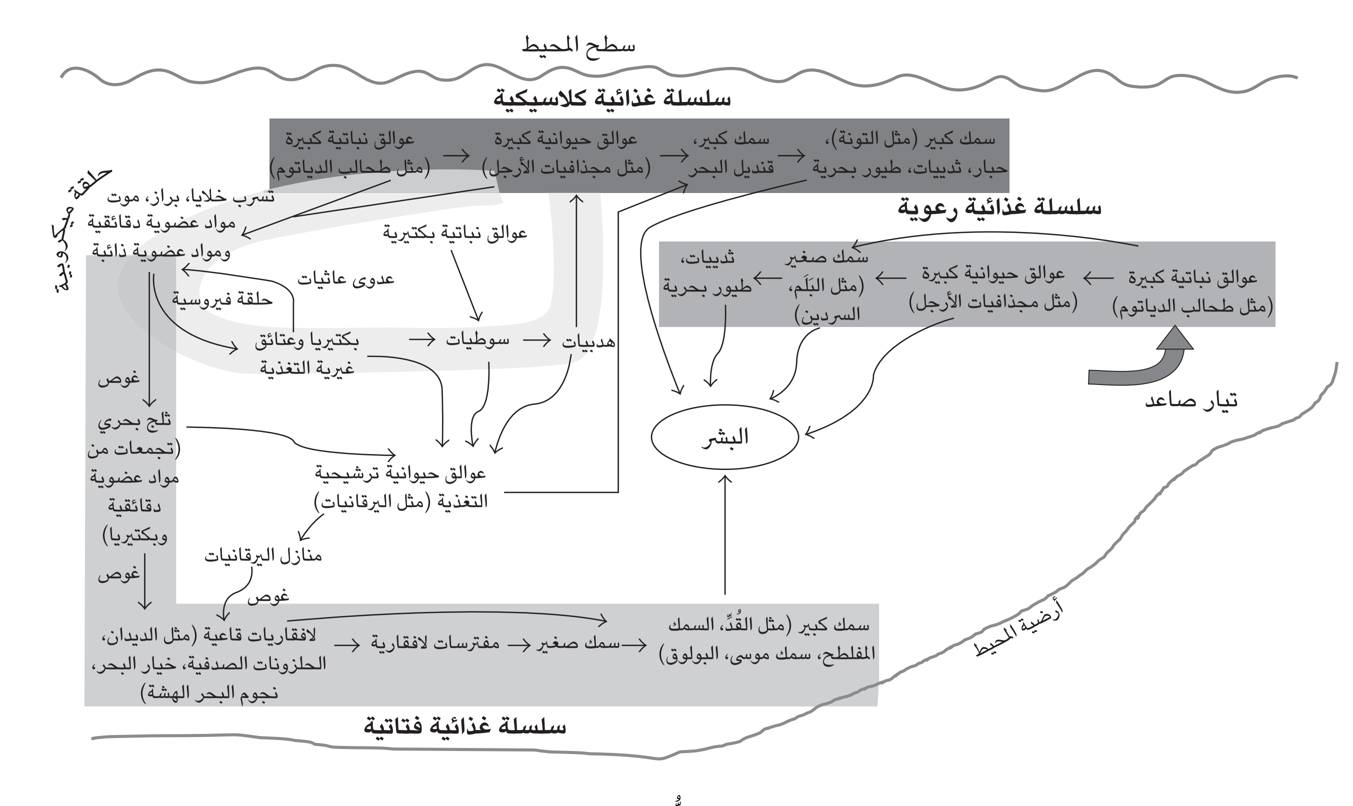
من المعروف الآن أن البكتيريا الذاتية التغذية المجهرية تنتج كميةً كبيرة من الإنتاج الأولي في المحيطات، وبوجه خاص في مياه المحيطات الفقيرة بالمغذيات. إن خلاياها صغيرة جدًّا بحيث لا يمكن للعوالق الحيوانية الكبيرة من السلسلة الغذائية الكلاسيكية الإمساكُ بها وتناولها، ولكن الطلائعيات السوطية الصغيرة (انظر شكل ٢-٥(ب)) يمكنها تناولها. لذلك تأكلها الطلائعيات المُهدَّبة (انظر شكل ٢-٥(ج))، وهي كبيرة بما يكفي لتتمكَّن العوالق الحيوانية الأكبر حجمًا، مثل مجذافيات الأرجل، من تناولها، وبالتالي ترتبط بالسلسلة الغذائية الكلاسيكية (انظر شكل ٢-٦).

ومن المعروف الآن أيضًا أن الكثير من إنتاج العوالق النباتية — ما يصل إلى ٥٠ في المائة في ظل ظروفٍ معينة — لا ينتقل إلى المستوى عبر الاستهلاك المباشر، بل «يتسرب» إلى مياه البحر المحيطة في صورة موادَّ عضويةٍ ذائبة. يَنتج بعض هذا التسرُّب عن الفقد السلبي للجزيئات العضوية عبر غشاء خلايا العوالق النباتية. غير أن العوالق النباتية تطرح بكثافة أيضًا جزيئات عضوية في مياه البحر لأسباب غير مفهومة بالكامل حتى الآن.



شكل ٢-٥: تنوُّع العوالق الحيوانية: (أ) مجذاف أرجل، (ب) طلائعيان سوطيان، (ج) طلائعي مُهدَّب، (د) يرقانية عملاقة. ج = جسم الحيوان، ذ = ذيل الحيوان © ٢٠٠٢، معهد بحوث ومتحف خليج مونتيرري المائي.

علاوة على ذلك، تُفقد المواد العضوية الذائبة والجسيمات الصغيرة من المواد العضوية الدقائقية؛ عندما تتفكَّك خلايا العوالق النباتية أثناء تغذِّي الحيوانات المفترسة عليها وبعد الموت الطبيعي للخلايا. كما تُطلق مجذافيات الأرجل وغيرُها من العوالق الحيوانية أيضًا؛ كمياتٍ كبيرةً من المواد العضوية الدقائقية في المحيطات في صورة براز، وعندما تموت وتتفتَّت. ومن الثابت أيضًا أن لعدوى العاثيات الفيروسية دورًا مهمًّا للغاية في فقدان المواد العضوية الذائبة والمواد العضوية الدقائقية من الميكروبات البحرية. وتشير التقديرات إلى



شكل ٢-٦: المسارات الرئيسية لتدفُّق الطاقة عبر النظام البحري.

أن الفيروسات تقتل نحو ٢٠ إلى ٤٠ في المائة من البكتيريا البحرية يوميًّا — وهو معدَّل إصابة كبير — وتُطلق كمياتٍ كبيرة من المواد العضوية الذائبة والمواد العضوية الدقائقية عندما تموت الخلايا المُضِيفة.

يؤدي فقدانُ المادة العضوية من كل هذه المصادر إلى تكوُّنِ تجمعٍ هائل من الطاقة الغذائية غير الحية في المحيطات (انظر شكل ٢-٦). الحجم الإجمالي لهذا التجمع، المُعبَّر عنه بالكربون، يُقدَّر بنحو ألف مليار طن، وهو ما يجعل ما يقرُب من الستة مليارات طن من الكربون الموجودة في جميع الكائنات الحية في المحيطات يبدو حجمًا ضئيلًا فيما يبدو مقارنةً به. الكثير من هذه المواد العضوية الذائبة في صورة كربوهيدرات، وأحماض أمينية، وبروتينات، ودهون.

تمتص البكتيريا والعتائق الغيرية التغذية الموادَّ العضوية الذائبة مباشرةً من مياه البحر وتستخدمها مصدرًا للطاقة. كذا تستعمر الموادَّ العضوية الدقائقية الطافية في مياه البحر وتستخرج منها الطاقة الغذائية. تقتل الفيروسات العديد من هذه الميكروبات بسرعة؛ ومن ثَم تُعيد إطلاق المواد العضوية الذائبة والمواد العضوية الدقائقية إلى مياه البحر. هذا التدوير السريع للطاقة ذَهابًا وإيابًا بين تجمع المواد العضوية الذائبة والمواد العضوية الدقائقية والبكتيريا والعتائق، الذي تتوسطه العاثيات، غالبًا ما يُشار إليه باسم «الحلقة الفيروسية» (انظر الشكل ٢-٦). وتلك البكتيريا والعتائق التي لا تُدركها العدوى الفيروسية تستهلكها السوطيات والهدبيات. ثم ترتبط هذه الطلائعيات بالسلسلة الغذائية الكلاسيكية التي أوضحناها سابقًا عندما تأكلها العوالق الحيوانية الكبيرة المتعددة الخلايا، مثل مجذافيات الأرجل (انظر شكل ٢-٦).

غالبًا ما يُشار إلى هذه المسارات الجرثومية لتدفُّق الطاقة على أنها «حلْقة ميكروبية»؛ لأنه عند تصويرها بيانيًّا فإنها تشكِّل «حلْقة» متصلة بالسلسلة الغذائية الكلاسيكية (انظر الشكل ٢-٦). إنَّ تدفُّق الطاقة عبر المستويات الغذائية الستة في الحلقة الميكروبية المركَّبة والسلسلة الغذائية الكلاسيكية — من البكتيريا والعتائق وصولًا إلى أعلى المفترسات مثل الحبَّار والتونة والطيور البحرية — يتضمن خمس عمليات لنقل الطاقة. لا يمكن تحويل سوى ما يقرب من ١٠ في المائة من الطاقة المتوفرة في كل مستوًى غذائي إلى كتلة حيوية في المستوى الغذائي التالي. ذلك لأن الكثير من الطاقة الغذائية التي تستهلكها الكائنات الحية في كل مستوًى غذائي تُفقد في صورة براز وتَنفَق في العمليات الأساسية للتمثيل الغذائي والبحث عن الغذاء. علاوة على ذلك، ليس كل الطعام المتاح في كل مستوًى

غذائي يمكن للكائنات الحية تحديدُ موقعه واستهلاكُه في المستوى التالي، ومن ثَم فهناك «هدر». لذلك فجزءٌ ضئيل فقط من أصل الإنتاج الأولي — نحو ٠٫٠٠١ في المائة — ينتهي به الحال في صورة لحم في المفترسات العليا في المستوى الغذائيِّ السادس. على الرغم من طولها وعدم كفاءتها النسبية، تُمثل هذه السلسلة الغذائية رابطًا غذائيًّا مهمًّا بين الكمية الهائلة من المواد العضوية غير الحية في المحيطات والحيوانات البحرية الكبيرة، والتي يستغلُّها البشر. وتكتسب أهميةً خاصة في مناطق المحيطات المفتوحة الشاسعة للمحيط العالمي حيث يصدر معظم الإنتاج الأولي من البكتيريا الذاتية التغذية التي تتميز بأنها أصغر حجمًا من أن تتمكَّن من دخول السلسلة الغذائية الكلاسيكية.

«تُصدَّر» بعض المواد العضوية الدقائقية التي تتكوَّن على سطح المحيطات في المياه العميقة حيث تغوص ببطءٍ عبر عمود الماء (انظر الشكل ٢-٦). وفي طريقها للأسفل، تتجمع جزيئات عضوية أصغر لتُكوِّن جزيئاتٍ أكبر تستعمرها البكتريا الغيرية التغذية، وتُصبح «ثلجًا بحريًّا»، وهو وابلٌ من رقائقَ صغيرة مبيضة من الفتات بحجم بضعة ملِّيمترات يمكن رؤيتها في الضوء من مركبة غواصة، أو مركبةٍ تعمل عن بُعد تحت الماء. تستخلص البكتيريا كميةً كبيرة من الطاقة الموجودة في الثلج البحري قبل أن تصل إلى أرضية المحيط، خاصةً في المياه الشديدة العمق فوق السهول السحيقة. غير أن الثلج البحري يمثل مصدرًا غذائيًّا مهمًّا للحيوانات البحرية التي تعيش في المياه العميقة للمحيطات وفي أرضية المحيط.

طورَت بعض أنواع العوالق الحيوانية طرقًا رائعة لاستغلال الثلج البحري باعتباره مصدرًا للطاقة. على سبيل المثال، شيَّدت حيواناتٌ صغيرة شبيهة بالشراغف تُعرف باسم اليرقانيات «منازلَ» منمَّقةً من أغشيةٍ رقيقة من المخاط. يمكن أن يصل طولُ هذه المنازل في بعض الأنواع إلى متر كامل (انظر شكل ٢-٥(د)). كما تُكوِّن ضرباتُ ذيول اليرقانيات تيارًا عبر المنزل يُصفِّي الجزيئات العضوية التي تنتقل بعد ذلك إلى فم الحيوان. تتخلَّص اليرقانيات من منازلها كل بضع ساعات بمجرد انسدادها، وسرعان ما تُفرِز منازلَ جديدة. تنهار هذه المنازل التي تُخلِّص منها، إلى جانب جميع الجسيمات العالقة عليها، وتغوص سريعًا في أرضية المحيط قبل أن تتمكَّن البكتيريا من استخلاص كلِّ ما بها من طاقة، وهو ما يَزيد بناءً عليه من مدخلات الطعام للحيوانات في أرضية المحيط.

تُكوِّن المادة الفتاتية التي تصل إلى أرضية المحيط القاعدةَ لسلسلةِ غذاء قاعية (انظر شكل ٢-٦). فالفتات تتغذَّى عليه حيواناتٌ مثل الديدان، والحلزون الصدفي، ونجوم البحر

الهشة، تأكلها بعد ذلك الحيواناتُ المفترسة مثل نجوم البحر، وسرطان البحر، والأسماك الصغيرة التي تعيش في القاع. ثم تأكل هذه الحيواناتِ مفترساتٌ أكبرُ بما في ذلك الأسماك ذات القيمة التجارية، كسمك فلاوندر، وسمك موسى، وسمك البولوق (انظر الفصل ٨).

توجد السلاسل الغذائية الرعوية في مناطق التيار الصاعد، وتُشبه في هيكلها السلسلةَ الغذائية الكلاسيكية (انظر شكل ٢-٦). في هذه الأنظمة، تُعد طحالب الدياتوم عادةً الكائنات المنتِجة الأولية الأساسية، وتوجد في صورة أزهار كبيرة الحجم وبأعدادٍ ضخمة. وترعى أسرابٌ ضخمة من الأسماك الصغيرة ذاتِ القيمة التجارية التي تتغذى بالترشيح، مثل البَلَم والسردين، بشكلٍ مباشر ومكثَّف؛ على طحالب الدياتوم، وعلى مجذافيات الأرجل التي تتغذى على طحالب الدياتوم. هذه الأسماك الصغيرة تأكلها بعد ذلك الأسماكُ الكبيرة، والثديياتُ البحرية، والطيور البحرية. تتضمَّن السلسلة الغذائية الرعوية عمليةً واحدة أو عمليتَين فقط من عمليات نقل الطاقة بين العوالق النباتية في المستوى الغذائي الأول، والأسماك ذات القيمة التجارية في المستوى الغذائي الثاني أو الثالث (انظر شكل ٢-٦). علاوة على ذلك، فإن كفاءة نقلِ الطاقة بين المستويات الغذائية في سلاسل الغذاء البسيطة هذه التي تشمل تجمُّعاتٍ مكثفةً من الكائنات الحية؛ يمكن أن تصل إلى ٢٠ في المائة. وبذلك فإن أنظمة التيار الصاعد تتميز بفعاليةٍ وإنتاجية عاليتَين، وبدعمها لمصايد الأسماك التجارية الكبيرة (انظر الفصل ٨).

البِنية الغذائية للأنظمة البحرية والبرية: دراسة للاختلافات

يبلغ إجماليُّ الإنتاجية الأولية للمحيط العالمي نحوَ ٥٠ مليار طن من الكربون سنويًّا. وفي المقابل، فإن إجماليَّ الإنتاجية الأولية لليابسة يبلغ نحو ٥٢ مليارَ طن سنويًّا. وبذلك يكون إجمالي الإنتاجية الأولية للكوكب ما يزيد قليلًا عن ١٠٠ مليار طن من الكربون سنويًّا، يأتي نصفها تقريبًا من المحيطات، ونصفُها الآخر من اليابسة. غير أن ثمة اختلافًا جوهريًّا في الطرق التي يتولَّد بها الإنتاج الأولي بين كلٍّ من أنظمة المحيطات والأنظمة البرية.

كما أوردنا في هذا الفصل؛ فإن الكائنات المنتجة الأولية في المحيطات هي عوالقُ نباتية غير مرئيَّة، أحادية الخلية، مجهرية، تشمل البكتيريا والطلائعيات. في المقابل، فإن الكائنات المنتجة الأولية على اليابسة هي نباتات كبيرة واضحةٌ للعيان تشمل الأشجار، والشجيرات، والعُشب، علاوة على المحاصيل الغذائية التي انضمَّت للقائمة حديثًا، بعد أن

دخلنا عصر الأنثروبوسين الذي يُهيمن عليه الإنسان. كما يُمثل إجمالي الكتلة الحيوية، أو المحصول القائم، من هذه الأنواع الشديدة الاختلاف من الكائنات المنتجة؛ تباينًا صارخًا كذلك. فإجمالي الكتلة الحيوية للكائنات المنتجة الأولية في المحيطات، التي يُعبَّر عنها بوزن الكربون في أنسجتها الحية؛ يبلغ نحوَ مليار طن، في حين أن إجمالي الكتلة الحيوية للكائنات المنتجة الأولية على اليابسة أكبرُ في الحجم عدة مرات؛ إذ يبلغ نحو ٤٥٠ مليار طن من الكربون. وهكذا فإن الكتلة الحيوية للكائنات المنتجة الأولية البحرية لا تَزيد على ٠,٢ في المائة من إجمالي الكتلة الحيوية للكائنات المنتجة الأولية على الكوكب؛ على الرغم من أعدادها الهائلة، ومن حقيقةِ أن بيئاتها تَشغل مساحةً وحجمًا أكبر بكثيرٍ ممَّا تشغله البيئات على اليابسة. لكنَّ اللافت للنظر أن الكائنات المنتجة الأولية البحرية تُنتج القدْر نفسَه من الإنتاج الأولي الذي تُنتجه جميع الكائنات المنتجة على اليابسة سنويًّا. قد تسنَّى ذلك بسبب معدَّلات الأيض العالية للغاية للعوالق النباتية البحرية، وكونها مولِّداتٍ عاليةَ الكفاءة للبناء الضوئي؛ مما يسمح لها بالنمو والانقسام بسرعات فائقة. والنتيجة هي أن العوالق النباتية في المحيط العالمي تُغيِّر كتلتها الحيوية بالكامل تقريبًا كلَّ سبعة أيام في المتوسط. في المقابل، يحدث تغيُّر معدَّلات الكائنات المنتجة الأولية البرية في حدود السنوات في المتوسط.



شكل ٢-٧: توزيع الكتلة الحيوية بين الكائنات المنتجة والمستهلكة في البيئات البرية والبحرية. الأرقام بمليارات الأطنان من الكربون.

تختلف أيضًا الهياكلُ الغذائية للأنظمة البحرية والبرية اختلافًا جوهريًّا. فعلى اليابسة، الأطنان التي يبلغ تقديرها التقريبي ٤٥٠ مليار طن من الكربون للكتلة الحيوية للكائنات المنتجة الأولية؛ تدعم قرابة ٢٠ مليار طن من الكائنات المستهلكة في جميع المستويات الغذائية الأعلى. ينتج عن هذا ما يُعد بوجهٍ عامٍّ هرمًا للكتلة الحيوية القائمة؛ حيث تكون الكتلة الحيوية للكائنات المنتجة الأولية أكبرَ بكثير من الكتلة الحيوية للكائنات المستهلكة. أما في المحيطات، فيدعم ما يقرُب من مليار طن من الكائنات المنتجة الأولية ما

مجموعُه نحوُ ٥ مليارات طن من الكائنات المستهلكة، مما ينتج عنه هرمٌ مقلوب للكتلة الحيوية (انظر شكل ٢-٧). في الشبكة الغذائية البيئية، يجب أن تكون الإنتاجية الأولية دائمًا أكبرَ من إجماليِّ إنتاجية الكائنات المستهلكة. ويمكن المداومة على توزيع الكتلة الحيوية القائمة «غير النموذجي» في البيئة البحرية بفضل التغيُّر الشديد السرعة في معدَّل الكائنات المنتجة الميكروبية الأولية في المحيط، كما أوردنا سابقًا؛ ومن ثَم تكون إنتاجيتها الناتجة أعلى بالضرورة من إجمالي إنتاجية الكائنات المستهلكة.

الفصل الثالث

الحياة في المحيط الساحلي

تتكوَّن المناطق الساحلية للمحيط العالمي من شريطٍ ضيق من المحيط يمتدُّ من الخط الساحلي إلى حافة الرف القاري. على الرغم من صِغر هذه البيئة المحيطية الساحلية نسبيًّا؛ إذ تمثل نحو سبعة في المائة فقط من مساحة المحيط العالمي؛ فهي ذات أهمية كبيرة للمجتمع البشري. وحاليًّا ما يقرُب من ٤٤ في المائة من السكان، أو ٣٫٤ مليار شخص، يتجمَّعون على طول الساحل أو يعيشون على مساحة ١٥٠ كيلومترًا من الساحل. يتزايد هذا الرقم سريعًا مع هجرة المزيد من الناس إلى المراكز الحضرية بالقرب من المناطق الساحلية. وأسفرَت التوقُّعات عن أنه بحلول نهاية القرن فإن ١٣ مدينة من أكبر مدن العالم البالغ عددها ١٥ مدينة، ستُصبح على الساحل أو على مقربة منه.

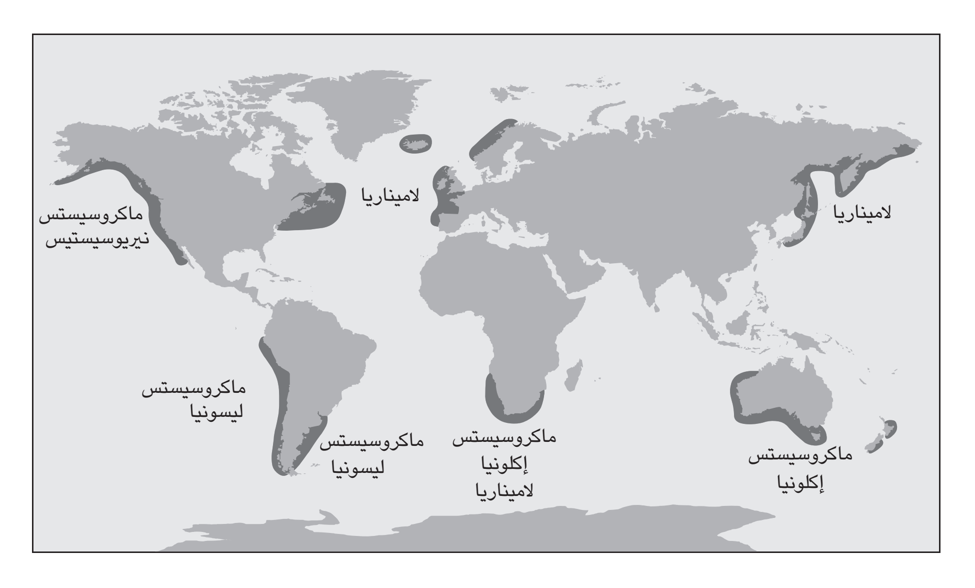
هذه العلاقة الوثيقة مع المجتمع البشري تعني أن المحيط الساحلي تلحق به آثارٌ جسمية. فهو بيئةٌ مستقبِلة للعديد من المنتجات الثانوية للأنشطة البشرية، مثل الملوِّثات الصناعية والزراعية، ومخلفات الصرف البشري والحيواني، والنُّفايات البلاستيكية، والانسكابات النفطية. يزداد الصيد في المحيط الساحلي موفرًا الكثيرَ من الأطعمة البحرية غير المستزرَعة التي يحصل عليها البشر من المحيطات. إنه أيضًا المكان الذي توجد فيه معظم عمليات تربية الأحياء المائية، مما يوفِّر المزيدَ من الأطعمة البحرية للاستهلاك البشري، ولكنها أيضًا تُخلِّف وراءها النُّفايات، مثل الأعلاف غير المستهلكة والمواد البرازية التي تتراكم وتتحلَّل في أرضية المحيط. علاوةً على ذلك، يُستغل المحيط الساحلي بكثافةٍ في توفير موارد أخرى مثل النفط والغاز.

بسبب قُرب المحيط الساحلي من اليابسة وضحالته النسبية؛ تسنَّى لنا دراسته بسهولةٍ نسبية عن طريق الغوص، وسفن الأبحاث الصغيرة، والأدوات الراسية، ومؤخرًا

عن طريق شبكات من آلاف المُستشعِرات المتصلة بالإنترنت التي تجمع بياناتٍ مستمرَّة آنيَّة عن فيزياء المحيطات وكيميائها، وبيولوجيتها. ومن ثَم تُجمَّع الكثير من المعلومات عن بيولوجيا الحياة البحرية الساحلية وآلية عمل النظم البيئية. إذا استُخدمت هذه المعرفة بطريقةٍ فعالة، فستُمكِّننا من إدارةٍ أفضل لمختلِف المواطن التي تُشكِّل البيئةَ الساحلية في مواجهة الوجود البشري المتنامي.

موائل غابات عشب البحر

غابات عشب البحر هي موائلُ بحريةٌ تتميز بالجمال والأهمية، وتوجد في القيعان الصخرية في المياه الضحلة بالقرب من الشاطئ. وتعيش في المناطق الساحلية الباردة والمعتدِلة؛ حيث لا تتجاوز درجاتُ حرارة المحيط عادةً ٢٠ درجةً مئوية. كما تشهد ازدهارًا كبيرًا في المياه الباردة الغنية بالمغذِّيات في مناطق التيار الصاعد الساحلية (انظر شكل ٣-١).



شكل ٣-١: التوزيع العالمي لغابات عشب البحر. أجناس غابات عشب البحر الموضَّحة على الخريطة هي السائدة في المنطقة المشار إليها.

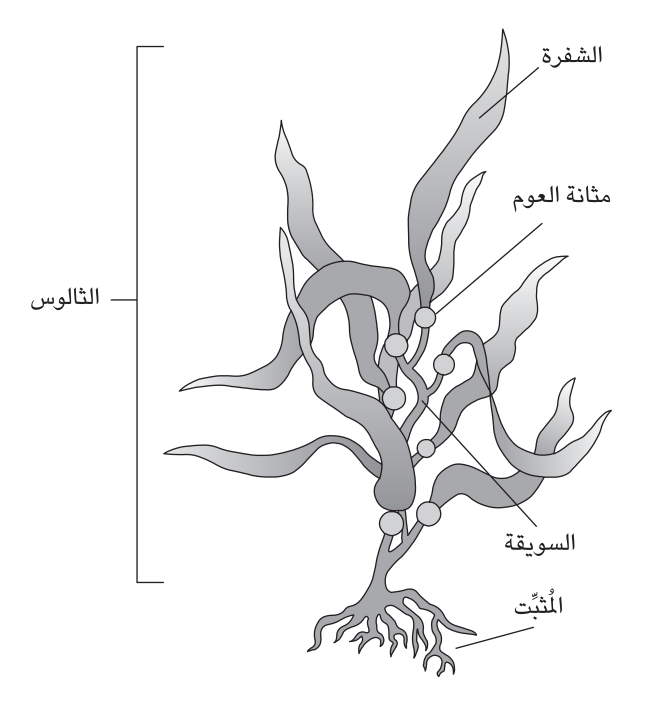
تتكون غابات عشب البحر من تجمعاتٍ كثيفة من الأعشاب البحرية البُنية، أو عُشب البحر العملاق. في حين أن معظم الكائنات التي تقوم بعملية البناء الضوئي في المحيطات هي كائناتٌ مجهرية، ووحيدة الخلية، وعالقة، فإن عشب البحر العملاق عبارة عن شكل كبير متعدِّد الخلايا من الطحالب التي تعلَق بقوةٍ في القاع عبر هياكلَ شبيهةٍ بالجذور، تُعرف باسم المثبِّتات (انظر شكل ٣-٢). المُثبِّت هو هيكل تثبيت، وليس نظامًا للجذور، وليس لعُشب البحر العملاق جهازٌ وعائي خاص لنقل الطعام والمغذيات عبر الثالوس. وبدلًا من ذلك، فإن عشب البحر العملاق يمتص المغذيات، والماء، وثانيَ أكسيد الكربون مباشرةً من مياه البحر المحيطة.

يبدأ عشب البحر العملاق حياته في صورةِ أبواغ مجهرية تستقرُّ في أرضية المحيط، وتنمو إلى نباتاتٍ مجهرية ذكَرية أو أنثوية، تُسمى بالنباتات المشيجية. والنبات المشيجي هو المرحلة الجنسية لدورة حياة العشب. تُنتج النباتاتُ المشيجية الذكرية الحيواناتِ المنوية، التي تُطلق في المحيط حيث تُخصِّب البويضات الموجودة على سطح النباتات المشيجية الأنثوية. وتنمو البويضات المخصَّبة لتصبح ثالوسيات، أو نباتات جرثومية، ترتبط في أذهاننا عادةً بعُشب البحر العملاق.

تتميز غابات عشب البحر بالإنتاجية العالية. ففي ظل الظروف المواتية ينمو عشبُ البحر العملاق بسرعةٍ كبيرة، وتبلغ بعضُ أنواعه أحجامًا كبيرة جدًّا. على سبيل المثال، يمكن لعشب البحر العملاق «الماكروسيستس»، المتوفرِ بكثرةٍ على طول سواحلِ أجزاءٍ كثيرة من العالم (انظر شكل ٣-١)؛ أن ينموَ بمعدَّلاتٍ تزيد على ٣٠سم في اليوم الواحد، وقد يصل طوله إلى أكثرَ من ٣٠ مترًا في أقلَّ من عام. وتُكوِّن أعشاب البحر العملاقة «غابات» تُشكِّل ظُلاتٍ سطحية كثيفة تُحمَل عاليًا في عمود مياه البحر بمساعدة عوَّامات مملوءة بالغاز تُسمى مثانات العوم.

توفِّر غابات عشب البحر الأساسَ لموئلٍ بحري شديد الخصوبة والتنوُّع. تعيش أنواعٌ كثيرة من الكائنات الحية عالقةً بسطح أعشاب البحر نفسها، أو مدفونةً في ثنايا المثبِّتات، ويوفِّر عشب البحر العملاق المأوى والغذاء للعديد من أنواع اللافقاريات والأسماك، بما في ذلك الأنواع التي تُحصَد لأغراضٍ تِجارية.

قنافذ البحر هي الكائن الرئيسي الذي يتغذَّى على عشب البحر العملاق؛ على الرغم من أنها عادةً ما تُزيل بطريقٍ مباشر القليلَ جدًّا من الكتلة الحيوية لعشب البحر العملاق الحي، ربما ١٠ في المائة أو نحو ذلك، ما لم توجد بأعدادٍ كبيرة جدًّا. يدخل الكثير من

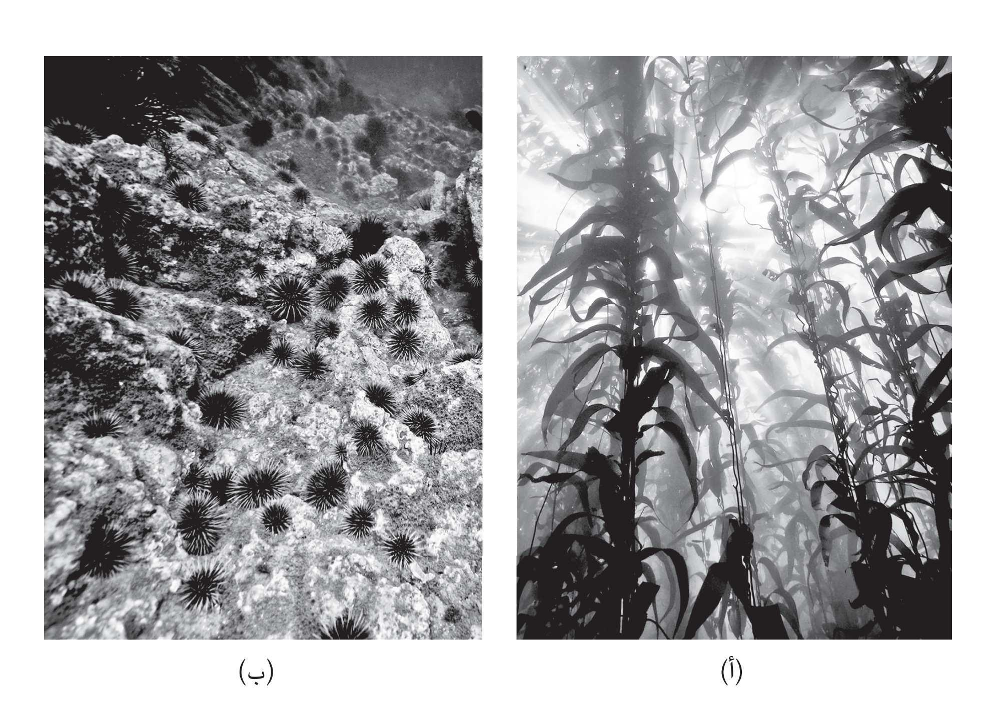


شكل ٣-٢: تركيب ثالوس عشب البحر العملاق.

طاقة عشب البحر العملاق المجتمعَ الحيوي لغابات عشب البحر في صورةِ مواد نباتية ميتة، تستهلكها مجموعةٌ من آكِلات الجيَف، بما في ذلك قنافذ البحر وأذن البحر إن وُجدت. ويتغذى على قنافذ البحر مجموعةٌ من المفترِسات التي تشمل أنواعًا من نجوم البحر، والقواقع، والأخطبوط، والكَرْكَند الشائك، وسرطان البحر، والأسماك. وفي شمال المحيط الهادي، تتغذى أيضًا ثعالبُ البحر على قنافذ البحر.

أظهرَت الدراسات الطويلة المدى لموائل عشب البحر العملاق أنه عُرضةٌ لرعي قنافذ البحر الجائر. عندما يحدث هذا، فإن مجتمعات عشب البحر العملاق الوارفة، والمنتجة، وذات التنوُّع البيولوجي تتحوَّل إلى «أراضٍ قاحلة من قنافذ البحر» يُخيم عليها الشحوبُ والقَفر (انظر شكل ٣-٣(أ) و(ب)). على الرغم من حدوث هذه «التحولات الطَّورية» بشكلٍ طبيعي على نطاقٍ محدود؛ فقد أصبحَت مؤخرًا مشكلةً أكثر تواترًا وذاتَ طابَعٍ عالمي. إذ شهدت غاباتُ عشب البحر انهيارًا سريعًا، وواسع النطاق، وكارثيًّا في جميع

أنحاء العالم، بما في ذلك شمال شرق المحيط الهادي في ستينيَّات وسبعينيات القرن العشرين، وشمال غرب المحيط الأطلنطي في السبعينيات والثمانينيات، وعلى طول ساحل النرويج في السبعينيات، ومؤخرًا جدًّا على طول الساحل الشرقي لتسمانيا في القرن الحادي والعشرين.



(ب) (أ)

شكل ٣-٣: انهيار غابات عشب البحر: (أ) غابة نموذجية من أعشاب البحر، (ب) أرضٌ قاحلة تسودها قنافذُ البحر التي حلَّت محلَّ غابةٍ من أعشاب البحر.

حقَّق علماء الأحياء البحرية تقدمًا جيدًا خلال العقود الثلاثة الماضية في كشف العوامل المختلفة التي من شأنها إجهادُ موائل غابات عشب البحر إلى الدرجة التي تجعلها عرضةً للتحول السريع إلى أرضٍ قاحلة من قنافذ البحر. فقد تمكَّنوا من التعرف على كلٍّ من عوامل الإجهاد الفيزيائي والبيولوجي التي غالبًا ما تتفاعل لبذلِ تأثير جمعي. ومعظمها نابعٌ من الأنشطة البشرية، أو تزيد تلك الأنشطة من تأثيرها.

يمكن أن يكون الإجهاد الفيزيائي المؤثِّر على غابات عشب البحر في صورة ارتفاع درجات حرارة المحيط عن درجاته الطبيعية أو في صورةِ أحوالٍ بحرية قاسية على غير المعتاد. على سبيل المثال، فإن الأوقاتَ التي تكون فيها مياهُ البحر دافئةً على غير المعتاد في المحيط الهادي لساحل أمريكا الشمالية، والناتجة عن انخفاض أو توقف التيار الصاعد للمياه الباردة العميقة؛ من شأنها أن تُمثل إجهادًا على عشب البحر العملاق لدرجةٍ تجعله عُرضةً لرعي قنافذ البحر الجائر، ولا سيما إذا كانت أعدادُ قنافذ البحر أعلى من المعتاد لأسباب أخرى. كما أن الموجات الكبيرة الناتجة عن العواصف والمرتبطة بأحداث ظاهرة النينيو الشديدة يمكنها أن تُمزِّق عشب البحر العملاق إلى أشْلاء، وتقتلعَ العديد منه عن مُثبتاته. يمكن أن يتبع ذلك تأثيرُ قنافذ البحر في المنطقة؛ حيث ترعى على أيٍّ من أعشاب البحر العملاقة النامية التي تحاول إعادةَ استعمار المنطقة وتَعوق إعادة تكوين موئل لعشب البحر العملاق. كما يزيد تغيرُ المناخ الذي يتسبَّب فيه الإنسان من تَكرارِ مثل هذا الإجهاد الفيزيائي على غابات عشب البحر، ويزيد كذلك من مدَّته وحجمه؛ مما يجعلها أكثرَ عُرضةً للرعي الجائر والانهيار.

إن التناقص في وفرة وجود مفترس رئيسي لقنافذ البحر نتيجةً للتدخلات البشرية، هو أحد العوامل المسهِمة في انهيار غابات عشب البحر التي قُتلتْ بحثًا. أحد الأمثلة الكلاسيكية على ذلك هو تفاعل المفترس والفريسة بين ثعالب البحر وقنافذ البحر. فمن خلال تغذِّيها على قنافذ البحر، تُحافظ ثعالب البحر على كثافة الرعي على عشب البحر العملاق في مستوًى أقلَّ من المستوى الحرِج، وهو ما يُساعد في الحفاظ على مجتمعٍ مستقر لغابات عشب البحر. ولكن إذا اختفَت ثعالب البحر بأعدادٍ كبيرة من النظام، يمكن أن تشهد أعدادُ قنافذ البحر زيادةً كبيرة؛ مما يزيد كثيرًا من الإجهاد الناتج عن الرعي المفرط على غابات عشب البحر.

بمجرد وصول أعداد قنافذ البحر إلى كثافةٍ حرجة، سرعان ما تنهار غابات عشب البحر لتصبح أراضيَ قاحلةً من القنافذ. لهذا السبب، غالبًا ما يُشار إلى ثعالب البحر باعتبارها أحدَ الأنواع الرئيسية، التي قد لا توجد بأعداد كبيرة ولكنها تلعب دورًا أساسيًّا في تشكيل بِنية المجتمع البحري والحفاظ عليها.

كانت ثعالب البحر على مدى التاريخ أحدَ الأعضاء الموجودة بوفرة في مجتمعات عشب البحر العملاق في المحيط الساحلي على طول حافة شمال المحيط الهادي؛ من شمال اليابان إلى ولاية باها كاليفورنيا. وقُدِّر إجماليُّ تَعداد جماعتها الطبيعية في حدود ١٥٠ ألف إلى ٣٠٠ ألف.

غير أن ثمة دليلًا من دراسة النُّفايات أنه قبل أكثر من ٢٠٠٠ عام اصطاد الصيادون الأليوتيون الأصليون في جزر ألوتيان ثعالب البحر بكثرة، وهو ما كان كفيلًا بإحداثِ تحوُّل لمواقع بِنْية المجتمع البحري الساحلي، من مجتمعٍ يُهيمن عليه عشبُ البحر العملاق إلى مجتمعٍ تُهيمن عليه قنافذُ البحر. وبدايةً من القرن الثامن عشر، بدأ تجارُ الفِراء في اصطياد ثعالب البحر على نطاق صناعي واسع؛ من أجل الحصول على فِرائها الكثيفة، وبحلول أوائل القرن العشرين لم يتبقَّ سوى بضعة آلاف من ثعالب البحر في جميع أنحاء نطاقها؛ حيث تأهُل فقط بعضُ الملاجئ الساحلية المعزولة. أدَّى هذا إلى تكوُّن أراضٍ قاحلة واسعةِ النطاق من قنافذ البحر في أماكنَ مثلِ جزر ألوتيان، وقبالة سواحل ألاسكا، وكندا، وأماكن أخرى. حُظِر صيد ثعالب البحر التِّجاري في الأغلب من عام ١٩١١ وبدأت الجهود الرامية إلى المحافظة عليها، مع وضع الجماعات الباقية من ثعالب البحر في مناطقَ معينة. نتيجةً لذلك، ارتفعَت أعداد ثعالب البحر إلى أكثرَ من ١٠٠ ألف حيوان تحتلُّ ثلثَي نطاقها السابق، ورُصد رجوع العديد من المناطق الوفيرة في ثعالب البحر الآن إلى موائل يُهيمن عليها عشبُ البحر العملاق.

من الأمثلة الأخرى على التأثير النابع من الأنشطة البشرية الهلاكُ الذي حلَّ مؤخرًا بغابات عشب البحر قبالةَ شرق تسمانيا. وذلك لأن احترار المحيط في المنطقة قد سمَح بانتشار أعداد كبيرة من قنافذ البحر «سينتروستيفانوس رودجيرسي» من البر الرئيسي لأستراليا باتجاه القطب إلى تسمانيا؛ مما يتسبَّب في الرعي الجائر على نطاقٍ واسع لعشب البحر العملاق، وانهيار أكثرَ من ٩٥ في المائة من غابات عشب البحر في شرق تسمانيا.

بمجرد تكوين الأراضي القاحلة من قنافذ البحر، يمكنها أن تستمرَّ عدةَ عقود. يرجع جزءٌ من السبب في ذلك إلى أنه بمجرد أن تستهلك قنافذُ البحر جميعَ أعشاب البحر العملاقة، تستمرُّ أعدادها؛ لأنه باستطاعتها البقاء على قيد الحياة عن طريق التغذية على مصادرَ أخرى للغذاء، بما في ذلك الطحالب ذات القشور الصلبة التي تنمو على أسطح الصخور العارية، وعلى اللافقاريات الصغيرة. وعادةً ما يتطلب الأمر حدثًا كبيرًا آخر؛ لتحفيز المنطقة على الرجوع إلى طبيعتها موئلًا لعشب البحر العملاق. يمكن أن يحدث هذا في هيئة نُفوق أعداد هائلة من قنافذ البحر، مما يُقلل من الإجهاد الناتج عن الرعي المفرط على نباتات عشب البحر العملاق النامية، ويُمهد الطريق لإعادة تكوُّن موئلٍ لعشب البحر. وقد ينتج مثلُ هذا النفوق الجماعي لقنافذ البحر عن مرضٍ يُصيبها، ومن المفارقة أن احترار المحيطات الناتجَ عن الأنشطة البشرية من المرجَّح أن يَزيد من تَكْرار أمراض

من هذا النوع؛ ومن ثَم يساعد في استعادة عشب البحر العملاق. هذا لأن الأوقاتَ التي تكون فيها مياه البحر دافئةً على غير المعتاد من شأنها أن تتسبَّب في إجهاد قنافذ البحر وفي جعلهم أكثرَ عرضةً لمسببات الأمراض.

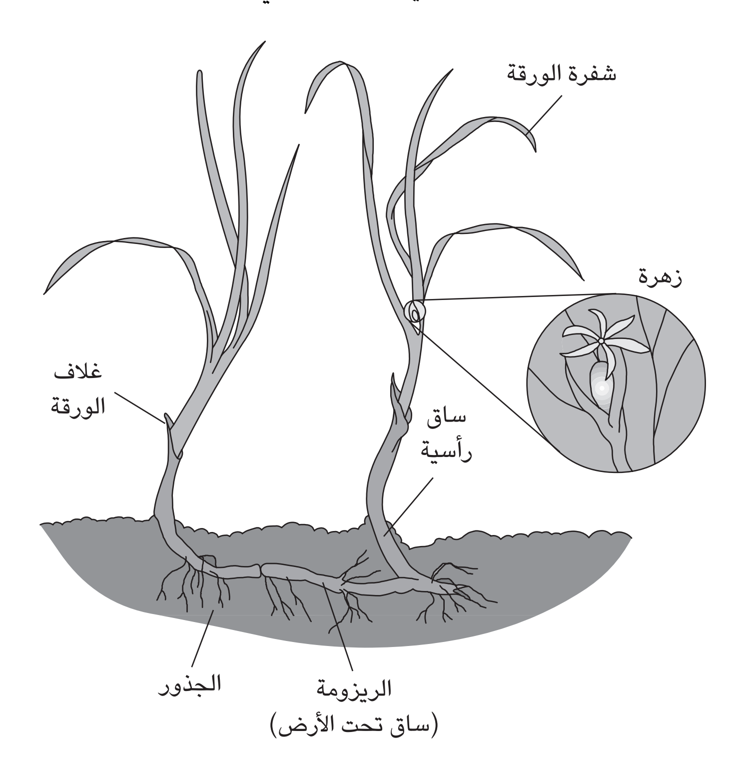
لا يزال هناك الكثير لنتعلمَه عن التغيُّرات المعقَّدة المصاحِبة لتدهورِ عشب البحر العملاق وتعافيه، وسيُصبح إجراء المزيد من البحث أمرًا بالغَ الأهمية في الإدارة المستقبلية لموائل غابات عشب البحر والإبقاء على مَزاياها البيئية والاجتماعية، لا سيما في تأثيرات النشاط البشري المتزايدة سريعًا على المحيطات.

مروج الأعشاب البحرية

تُعد الأعشاب البحرية أساسًا لنوعٍ مهم آخَر من الموائل البحرية الواسعةِ الانتشار في القيعان الرملية والطينية للمياه الضحلة من المناطق المدارية إلى القطب الشمالي؛ حيث إن القارَّة القطبية الجنوبية هي القارة الوحيدة التي تخلو من الأعشاب البحرية. على خلاف عشب البحر العملاق؛ فإن الأعشاب البحرية هي نباتات مزهِرة تكيَّفَت للعيش مغمورةً بالكامل في مياه البحر. وقد نشأت في الأصل على اليابسة وهي المجموعة الوحيدة من النباتات المزهرة التي أعادت استعمارَ البيئة البحرية.

تمتلك الأعشاب البحرية جذرًا حقيقيًّا وجهازًا وعائيًّا وتمتص مغذياتها من الرواسب التي تعيش عليها (انظر شكل ٣-٤). أوراقها عبارة عن شفرات طويلة، ورفيعة، ومرنة؛ إذ يبلغ طولها عادةً من نحو ١٠سم إلى ٥٠سم، غير أنه قد يصل إلى بضعة أمتار في بعض الأنواع. تستعمر الأعشاب البحرية قاعَ البحر بمدِّ سيقانٍ تحت الأرض، أو ريزومات؛ حيث تُنبت نباتات جديدة. يمكنها أيضًا التكاثرُ جنسيًّا، عبر حمل التيارات لحبوب اللقاح بين الزهور، وبنثر التيارات للبذور كذلك.

تتميز الأعشاب البحرية بإنتاجيتها العالية. يمكن للشفرات أن تنموَ بمعدَّل سنتيمتر كامل في اليوم وتتساقط وتُستبدل باستمرار. وهكذا يمكن للأعشاب البحرية أن تُشكِّل مروجًا شاسعةً تُغطي عشرات الآلاف من الهكتارات وتضمُّ آلاف الأوراق في كل متر مربع من قاع البحر. وتشهد مروج الأعشاب البحرية أوجَ وفرتها في المياه التي لا يزيد عمقها على ١٠ أمتار؛ حيث تكون مستويات الضوء عالية، غير أنه يمكن العثور عليها على أعماقٍ تزيد على ٤٠ مترًا في مياه بحر شديدة الوضوح. في المناطق المعتدلة، تمثِّل «الزوستيرة»،



شكل ٣-٤: تكوين الأعشاب البحرية.

أو عشبة الأنقليس، نوعًا واسع الانتشار من الأعشاب البحرية، بينما تشيع «الثالاسيا»، أو عشب السلحفاة، في المناطق الاستوائية.

تشكِّل الأعشاب البحرية الأساسَ لمجتمع متنوِّع. فنجد أن عدة أنواع من الكائنات المتشبِّثة وذات القشور تستعمر سطح شفرات الأعشاب البحرية، في حين أن أنواعًا مختلفة من الحيوانات المنقِّبة، مثل الحلزون الصدفي والديدان، توجد بين الجذور. توفِّر هذه الكائنات الحية مصدرًا غنيًّا للغذاء والمأوى للأسماك والحيوانات الأخرى، بما في ذلك الأنواع المهمة تِجاريًّا.

في المناطق المعتدلة، يوجد عددٌ قليل من الحيوانات التي يمكنها الرعي مباشرةً على شفرات الأعشاب البحرية القاسية، باستثناء بعض الطيور؛ مثل البجع، والأوز،

والبط. وفي المياه الاستوائية، تتغذى حيوانات الرعي الكبيرة مثل خِراف البحر والأطوم، والسلاحف الخضراء مباشرةً على أوراق الأعشاب البحرية الحية. تتحطَّم الأوراق الميتة وجذور الأعشاب البحرية بفعل البكتيريا والفطريات وتتغذى عليها مجموعةٌ من آكلات الحتات مثل الديدان، وسرطان البحر، ونجوم البحر الهشة، وخيار البحر.

ترتبط السلحفاة الخضراء، «تشيلونيا ميداس»، ارتباطًا وثيقًا بمروج الأعشاب البحرية. وتمثل السلاحف الخضراء راعيًا رئيسيًّا للأعشاب البحرية؛ لذلك تُسمى بعض الأنواع الاستوائية من أعشاب البحر بعشب السلحفاة. يمكن للسلحفاة الخضراء البالغة أن تأكل نحو كيلوجرامَين من الأعشاب البحرية يوميًّا.

تتزاوج السلاحف الخضراء في البحر وتعود الإناث إلى الشواطئ نفسِها التي فقست فيها لتضع بيضها. تحفر الأنثى حفرةً في منطقة جافة من الشاطئ حيث تضع بيضها. ثم تُغطي البيض بالرمل وتعود أدراجَها إلى المحيط. وقد ترجع الأنثى عدة مرات إلى الشاطئ نفسِه أثناء موسم التكاثر على فترات؛ من بضعة أسابيع كي تضع دفقاتٍ متتاليةً من البيض. يفقس البيض بعد بضعة أشهر، وعادةً ما يكون ذلك في الليل، وسرعان ما تنطلق فراخ السلاحف إلى المحيط. وهنا تبقى في المياه الساحلية بالقرب من مكان فقسِها لتتغذَّى وتنمو. عندما تنضج السلاحف، تُهاجر إلى أرضٍ جديدة من الأعشاب البحرية للتغذية؛ حيث تبقى هناك حتى تُصبح مستعدةً للعودة إلى شواطئ أعشاشها من أجل التكاثر. يمكن أن تُغطيَ هذه الهجرات مسافاتٍ شاسعة. على سبيل المثال، تتغذى جماعةٌ من السلاحف الخضراء على الأعشاب البحرية على طول الساحل البرازيلي، ولكنها تهاجر مسافةً تزيد على ٢٣٠٠ كيلومتر من شواطئ أعشاشها في جزيرة أسينشين الصغيرة في وسط جنوب المحيط الأطلنطي؛ من أجل التكاثر. وتستعين السلاحف بزاويةِ أشعة الشمس واتجاه الموج والرائحة؛ لتفقُّدِ طريقها إلى الجزيرة.

تُصطاد السلاحف الخضراء بكميات كبيرة في جميع أنحاء العالم للحصول على لحمها، كما يُحصد بيضها من شواطئِ تعشيشها للتغذي عليه. وبذلك انخفضَت أعداد السلاحف الخضراء بشكل كبير وأصبحت من الأنواع المهدَّدة بالانقراض على مستوى العالم. وقد قُدِّر أنه في عصورٍ ما قبل كولومبوس كان هناك أكثرُ من ٩٠ مليون سلحفاة خضراء تقطن البحر الكاريبي وحده. وفي مذكراتهم، وصَف المستكشفون السلاحفَ الخضراء في منطقة البحر الكاريبي بأنها «بأعدادٍ لا نهائية»، و«تكاثر لا ينضب». منذ ذلك الحين شهدَت أعدادها خَسارةً فادحة؛ حيث انخفضَت لتصل الآن إلى نحو ٣٠٠ ألف،

أو ٠٫٣٣ في المائة من أعدادها التي كانت عليها عبر التاريخ. وحيث إن أعدادها الآن منخفضةٌ للغاية؛ فقد أصبح تأثيرها على مجتمعات الأعشاب البحرية حاليًّا ضئيلًا، ولكن في الماضي كان بإمكان السلاحف الخضراء أن تقتاتَ بأعدادٍ هائلة على نحوٍ استثنائي على الأعشاب البحرية. فقد كان من شأنها أن تُحافظ على اقتصاص أعشاب البحر، كالمسطحات الخضراء، وأن تُقلل من كثافة المروج، ومن ثَم تُقلل من المنافسة المباشرة بين الأنواع المختلفة لأعشاب البحر وتسمح بالتعايش بين العديد من الأنواع. من دون السلاحف الخضراء في النظام، أصبحَت الآن مروجُ الأعشاب البحرية في أغلبها نوعًا أحاديًّا مهيمنًا واحدًا.

خِراف البحر والأطوم هي من الثدييات البحرية الكبيرة التي ترعى أيضًا على الأعشاب البحرية. تعيش الأطوم في المياه الدافئة للمحيط الهندي والمحيط الهادي؛ حيث توجد خراف البحر في منطقة البحر الكاريبي وخليج المكسيك، وقبالة سواحل غرب أفريقيا. وقد تبيَّن أن الأطوم في أستراليا تُصمِّم مروجًا للأعشاب البحرية على غِرار السلاحف الخضراء. فتعمل مجموعاتُ الأطوم على ترقيق مروج الأعشاب البحرية، مما يخلق مساحةً لمزيدٍ من أنواع الأعشاب البحرية للتعايش ولإعادة تكوين النباتات النامية والأعلى في القيمة الغذائية. وقد شُبِّه هذا بـ «استنبات» الأطوم لمروج الأعشاب البحرية بطريقةٍ توفر لها تغذيةً محسَّنة.

تُعد الأعشاب البحرية ذاتَ أهميةٍ كبيرة للمجتمع البشري. فنظرًا إلى كفاءتها في محاصرة الرواسب والربط بينها، تعمل على استقرار قاع المحيط، وتساعد في حماية السواحل من التعرية. كما تعمل مروجُ الأعشاب البحرية أراضيَ حاضنة ومناطقَ علفية للعديد من أنواع الأسماك ذات الأهمية التجارية، وكذلك للَّافقاريات ذات الأهمية التجارية مثل الحلزون الصدفي، وسرطان البحر، والجمبري، والمحار.

لذلك مما يُثير قلقًا بالغًا التدهورُ الخطِر في مروج أعشاب البحر في جميع أنحاء العالم. فقد أظهر تقييمٌ عالمي شامل اختفاءَ ٢٩ في المائة من مروج الأعشاب البحرية المعروفة بين عامَي ١٨٧٩ و٢٠٠٩. وبلغ معدَّل الخسارة نحو واحد في المائة قبل عام ١٩٤٠، غير أنه قد تزايد إلى نحو سبعة في المائة في السنة منذ عام ١٩٩٠. جزء كبير من هذا ناتجٌ عن عمليات تصريف مياه الصرف، والتنمية الساحلية، وتجريف قاع البحر، وهي الأنشطة التي تُطلق كمياتٍ زائدة من المغذيات والرواسب إلى المياه الساحلية، مما يُقلل من نقاء المياه ويؤدي إلى اختناق الأعشاب البحرية. كما تؤدي مراوحُ القوارب ومراسيها

إلى التمزيق المستمرِّ لمروج الأعشاب البحرية. علاوةً على ذلك، فإن الأعشاب البحرية التي يُجهدها التلوث أو ارتفاع درجات حرارة المحيطات تكون أكثرَ عرضةً للإصابة بالأمراض.

من الواضح أن البشر بحاجةٍ إلى إيلاء قيمة أكبر بكثير لموائل الأعشاب البحرية واتخاذ الخطوات اللازمة للحفاظ عليها. وهذا يعني حماية موائل الأعشاب البحرية المهمة من عمليات التنمية الساحلية وتوعية سائقي القوارب الترفيهية بعدم القيادة في المناطق الضحلة الكثيفة بالأعشاب البحرية، وبالابتعاد عن الرسوِّ على مروج الأعشاب البحرية.

مجتمعات القاع اللين

تتكوَّن مساحاتٌ شاسعة من المناطق الساحلية للمحيط العالمي من قيعانٍ رملية أو طينية. وتتأثَّر هذه الموائل بشدةٍ بالتيارات وحركة الأمواج، خاصةً في الأعماق الضحلة. فتوجد القيعان الرملية حيث تهبُّ التيارات القوية بما يكفي لحمل جزيئات الطين الدقيقة التي يسهُل تعلُّقها في المياه بعيدًا، تاركةً وراءها حُبيبات الرمل الخشنة. وتوجد القيعان الطينية في المناطق القليلة التيار، وتميل إلى أن تكون غنيةً بالجزيئات الدقيقة التي تستقرُّ وتتجمع في مثلِ هذه المناطق. في كلتا الحالتين، ثَمة غيابٌ تام للغطاء النباتي، وتهيمن الحياة الحيوانية على هذه الموائل.

توجد معظم الحيوانات التي تعيش في موائل القاع اللين مدفونةً في الرواسب ويُشار إليها باسم الكائنات الحية القاعية. وتشمل في معظم الأنحاء أنواعًا مختلفة من الحلزون الصدفي والديدان التي تعيش في الجحور. والعديد منها من آكلات العوالق التي تُرشِّح العوالق والجزيئات العضوية من مياه البحر التي تعلوها. تمدُّ الحلزونات الصدفية الآكلة للعوالق سيفونات طويلة من جحورها لأعلى إلى سطح الرواسب وتضخُّ هذه المادة الغذائية العالقة. أما الديدان الآكلة للعوالق فغالبًا ما تعيش في أنابيبَ تمدُّ منها مجموعةً من اللوامس التي تستخدمها لترشيح الجسيمات العالقة. من ناحية أخرى، فإن بعض الحلزونات الصدفية والديدان القاعية هي من آكلات الرواسب، حيث تحصل على الغذاء بالاستهلاك المباشر للرواسب وهضم المواد العضوية والبكتيريا الموجودة في الرواسب أثناء مرورها عبر أحشائها.

ليس كلُّ أعضاء مجتمعات القاع اللين من ساكني الجحور. فبعضها، الذي يُشار إليه باسم الكائنات الحية القاعية الفوقية، يعيش على سطح الرواسب، وتشمل نجوم البحر الهشة، وقنافذ البحر، ونجوم البحر، وخيار البحر، ودولار الرمل، والقواقع، وسرطان

البحر، والجمبري. يتغذَّى العديدُ من هذه الكائنات التي تعيش على سطح الرواسب إما عن طريق التقاط الجزيئات العضوية الجاثمة على سطح الرواسب أو بابتلاع وهضم الجزيئات العضوية التي تحتوي عليها، كما تفعل آكلاتُ الرواسب القاعية. أما الكائنات الأخرى مثل القواقع، وسرطان البحر، ونجوم البحر، فهي من المفترسات؛ إذ تتغذى على أعضاءٍ آخرين في المجتمع.

تدعم الأعضاء القاعية والقاعية الفوقية في مجتمعات القاع اللين مجموعةً من الأسماك المفترسة التي تتغذَّى على القاع والتي تعيش في قاع المحيط أو بالقرب منه. ويشمل هذا الورانك والشِّفنِينِيَّات وغيرها الكثير من الأنواع المهمة تِجاريًّا مثل أسماك الحدوق، والبولوق، وسمك النازلي، وسمك القد وكذلك السمك المفلطح؛ مثل سمك فلاوندر، والهلبوت، وسمك موسى. عادةً ما تُصطاد هذه الأسماك التي تعيش في القاع، والمعروفة مجتمِعةً باسم الأسماك القاعية أو أسماك القاع، باستخدام شِباك الصيد القاعية، وتلعب دورًا حيويًّا في غذاء الجماعات البشرية.

المناطق الساحلية الميتة

تتعرَّض العديد من الأنظمة البحرية الساحلية للإجهاد والتغيير بشكلٍ كبير؛ نظرًا إلى إطلاق المغذيات الزائدة في المياه الساحلية الذي تتسبَّب فيه الأنشطة البشرية، وهي العملية التي يُشار إليها باسم الإثراء الغذائي. ويُعد المسبب الرئيسي في ذلك هو المركَّبات التي تحتوي على النيتروجين والفوسفور.

دورة النيتروجين هي واحدة من أكثر دورات المغذيات التي شهدَت تغيرًا في الكوكب بسبب النشاط البشري. ويُعد استخدام الأسمدة النيتروجينية على اليابسة للحفاظ على خصوبة التربة وزيادة غلة المحاصيل؛ مصدرًا رئيسيًّا من مصادر التلوث بالنيتروجين. هذا لأن جزءًا من مركَّبات النيتروجين التي تُنشر على الأراضي الزراعية لا تتضمَّنها المحاصيل بل تتسرب بفعل الأمطار إلى الجداول والأنهار؛ ومن ثَم إلى المحيطات. كما أن الكثير من النيتروجين الذي يُرشَّح من الأراضي الزراعية يكون في صورة نترات.

من المصادر الأخرى للتلوث بالنيتروجين عمليات تصريف النُّفايات البشرية والحيوانية. كما تُنتج مركَّبات النيتروجين أيضًا أثناء حرق الوقود الأحفوري، والأخشاب، ومخلفات المحاصيل، التي ينتهي بها الحال في الأنهار والمحيطات في صورة حمض النيتريك في الأمطار الحمضية.

يُعد الاستخدام المكثَّف للأسمدة الفوسفاتية مصدرًا رئيسيًّا من مصادر التلوث بالفوسفور. وذلك لأن بعضًا من الفوسفات ينجرف إلى الجداول والأنهار، ومعظمه يلتصق بجزيئات التربة؛ ومن هنا يجد طريقه إلى المحيطات. كما تُعد نُفايات الصرف البشرية والحيوانية مصدرًا آخرَ لمركَّبات الفسفور، كما في عمليات إزالة الغابات. في تلك الحالة الأخيرة، ينجرف في الأنهار بعضٌ من التربة التي تصبح عاريةً بعد إزالة الأشجار، وكذلك رماد الأشجار المحترقة، وكلاهما يحتوي على الفوسفور. تُقدَّر تركيزات الفوسفور في العديد من الأنهار الآن في المتوسط بضَعف المستويات الطبيعية، وينتهي الكثيرُ منها في المحيطات.

يُحفِّز الإثراء الغذائي للمحيطات بالنيتروجين والفوسفور الزائدَين الإزهارَ الهائل للعوالق النباتية، خاصةً في المياه الساحلية. وعندما تموت هذه الكتلة من الكائنات المنتجة الأولية، تتحلَّل وتستهلك المزيد من الأكسجين في مياه البحر. إذا انخفضَت مستويات الأكسجين الذائب عن المستويات اللازمة للحفاظ على معظم الحياة البحرية في المنطقة، حوالي مليلترَين لكل لتر من مياه البحر، فإن النتيجة ستكون تكوُّن «مناطق ميتة» بحريةٍ مؤقَّتة أو دائمة. ويرتبط بالمناطق الميتة كلٌّ من فقدان التنوُّع البيولوجي، وارتفاع معدَّل نفوق الأسماك، وانهيار مصايد الأسماك المحلية.

تضاعَف عدد المناطق البحرية الميتة في المحيط العالمي تقريبًا كلَّ عَقدٍ من الزمان منذ ستينيَّات القرن العشرين، وقد استقر الآن على عدد ٥٠٠ منطقة، بعد أن كان أقلَّ من ٥٠ منطقة في عام ١٩٥٠. وليس من المستغرَب شيوعُ المناطق الميتة في المساحات المعرَّضة لصرف المياه من الزراعة الكثيفة. فالمنطقة الميتة في خليج المكسيك هي من السمات الموسمية التي تنتج عن تصريفِ الموادِّ الغذائية بكميةٍ هائلة في الربيع إلى الخليج من نهر المسيسيبي، الذي يجرف مساحةً كبيرة من الأراضي المزروعة بكثافة. عادةً ما تُغطي هذه المنطقة مساحةً من نحو ١٥ ألف إلى ١٨ ألف كيلومتر مربع، على الرغم من أنها كانت تقترب من ٢٣ ألف كيلومتر مربع في عام ٢٠١٧. وبعيدًا عن التدمير الشامل للنظام البحري الطبيعي؛ فإن هذه المنطقة الميتة تؤثِّر سلبًا على المصايد التجارية والترفيهية للجمبري والمحار في الخليج. توجد مناطقُ ميتة أخرى في أجزاءٍ من بحر البلطيق، وشمال البحر الأدرياتيكي، وخليج تشيسابيك، والعديد من المواقع في المناطق الساحلية في شرق آسيا. وتُعد المنطقة الميتة في بحر البلطيق واحدةً من أكبر المناطق الميتة على الكوكب، وتغطي الآن بانتظامٍ مساحةَ نحو ٧٠ ألف كيلومتر مربع، وهي مساحة في حجم مساحة أيرلندا تقريبًا.

المناطق الميتة هي من السمات الضارَّة في المحيطات الساحلية، وتتزايد بسرعة في العدد والحجم. غير أنه يمكن إيقاف هذا المسار وعكسه في نهاية المطاف من خلال تطبيقٍ واسع النطاق لممارسات زراعية منضبطة، تعمل على تحسين استخدام الأسمدة والتقليل منه، والاستثمار في تحسين أنظمة إدارة الصرف.

الإزهار الضار للعوالق النباتية

كثيرًا ما يحدث إزهارُ العوالق النباتية السامة في المياه الساحلية. وعادةً ما يُشار إليه بمصطلح «إزهار الطحالب الضارة». ويمكن أن تكون كثافاتُ خلايا العوالق النباتية في هذا الإزهار عاليةً لدرجةٍ تُغيِّر من لون المحيط، أحيانًا إلى لونٍ ضارب إلى الحُمرة؛ ولذلك تُعرف بالاسم الشائع «المد الأحمر».

يُنتَج إزهار الطحالب الضارة من عدد صغير من أنواع العوالق النباتية، السَّوطيات الدوَّارة في كثيرٍ من الأحيان، والتي تنتِج مجموعةً من السموم القوية التي يمكن أن تُفرَز في مياه البحر. ثم تنتقل هذه السموم بعد ذلك عبر الشبكة الغذائية، فتتراكم أولًا في العوالق الحيوانية التي تتغذى على العوالق النباتية السامة، وفي حيوانات مثل الحلزونات الصدفية، وبلح البحر، والأسقلوب، والمحار التي تتغذَّى بالترشيح على العوالق السامة. ثم يمكن أن تنتقل السموم إلى أعلى السلسلة الغذائية وصولًا إلى الأسماك، والطيور البحرية، والثدييات البحرية. ويمكن أن تتأثر كلُّ هذه الكائنات بدرجةٍ أكبر أو أقلَّ عبر استهلاك هذه السموم، مما يؤدِّي في بعض الأحيان إلى نُفوق أعداد كبيرة من الأسماك وأعضاء الحياة البحرية الآخرين، بما في ذلك الطيور البحرية والثدييات البحرية، ويتسبب في إغلاق المصايد المحلية.

يمكن أن يُعاني البشر الذين يتغذَّون على المحاريات والأسماك الملوَّثة أعراضًا عصبية، مثل وخز الأصابع وشلل عضلي، وكذلك مشكلات تنفُّسية وأعراض مَعدية مِعَوية مثل الإسهال، والقيء، وتشنُّجات البطن. ومن شأن هذه الأعراض أن تكون بالغةَ الحِدة وقاتلةً في بعض الأحيان. وفي بعض الأحيان، يمكن أن تصبح العوالق النباتية السامة معلَّقةً في الهواء بفعل حركة الأمواج، ما يُكوِّن رذاذًا ساحليًّا يمكنه أن يُسبب أعراضًا شبيهة بأعراض الربو عندما يستنشقه البشر.

يُمثل إزهار الطحالب الضارَّة العرَضي ظاهرةً طبيعية، وربما كان دائمًا سمةً من سمات المياه الساحلية. وقد وصف المستكشفون الأوائلُ في القرنَين السابع عشر والثامن

عشر أحداثَ تغيُّر لون المياه، ولاحظوا أن الشعوب الأصليِّين الساحليِّين يتجنَّبون حصادَ المحاريات في أوقاتٍ معينة من العام في أماكنَ بعينها؛ خوفًا من التسمم. غير أن المناطق الساحلية في جميع أنحاء العالم تشهد في العقود الأخيرة أحداثًا لإزهار الطحالب الضارة بوتيرة، واستمرارية، ونطاق جغرافي أكبرَ بكثير، وتؤثِّر على عددٍ أكبر من أنواع العوالق النباتية.

لم يتَّضح كليًّا السببُ وراء حدوث ذلك. فقد يُفسَّر جزئيًّا بالتحسُّن في تحديد أحداث الإزهار السام وتسمُّم الغذاء والإعلان عنها، ولكن يكاد يكون من المؤكد ارتباطُ الأمر بالإثراء الغذائي في المياه الساحلية التي تُعزز إزهار العوالق النباتية. إضافةً إلى ذلك، فإن أنواع العوالق النباتية السامة تُنقل بانتظامٍ من ميناء إلى آخر حول العالم عبر مياه صابورة السفن. مياه الصابورة هي مياهُ بحر تُضخُّ في خزانات الصابورة وحمولات الشحن للسفن؛ لمنحها استقرارًا أفضلَ أثناء السفر. وعادةً ما تُستخدم مياه الصابورة عندما تُنزِل السفينةُ حمولتها في أحد الموانئ وقد خفَّت حمولتها أو أصبحَت بلا حمولة. فتُستخدَم ملايينُ اللترات من مياه البحر في كل مرة، ثم غالبًا ما تُنقل وتُطرح في الميناء التالي عندما تحمل السفينةُ حمولةً جديدة. تُعد هذه من الآليات المحتملة المتسبِّبة في توسيع نطاق أنواع العوالق النباتية السامة. فبعض الأنواع يمكنها أن تُنتج أكياسًا — وهي مرحلةُ راحةٍ طويلة الأجل من دورة حياتها — من شأنها أن تظلَّ كامنةً في رواسب القاع سنواتٍ عديدةً حتى تُصبح الظروف مواتيةً لنموها، مما يُشكِّل البداية لأحد أحداث إزهار الطحالب الضارة.

الاجتياحات البيولوجية

يمكن أن تتعرَّض العديد من الكائنات البحرية الأخرى في المياه الساحلية علاوةً على العوالق النباتية السامة؛ للضخِّ في خزانات صابورة السفن. عندما تكون السفينة في المياه الضحلة، يمكنها أيضًا أن تعمل على ضخِّ الرواسب وأيِّ كائنات ترتبط بها وتعيش في القاع. وعندما تُضَخ مياه الصابورة بعد ذلك، قد تُطلق معها أيضًا هذه الكائناتُ الحية. بهذه الطريقة تدخل إلى المناطق المختلفة كائناتٌ دخيلة سامة أو لا تنتمي إلى المنطقة؛ حيث لا توجد فيها عادةً دون تدخلٍ بشري. يُنقل ما يقرب من ١٠ مليارات طن من مياه الصابورة على مستوى العالم كلَّ عام، وتُنقل آلاف الأنواع البحرية حول العالم في مياه الصابورة كل يوم.

تنقل السفن أيضًا الكائنات البحرية إلى مسافاتٍ طويلة بطرقٍ أخرى، حيث تستعمر الكائناتُ الحية الحفَّارة، مثل ديدان السفن، هياكل السفن الخشبية كما تُفسد الكائنات العالقة بها مثل البرنقيل والأعشاب البحرية تلك الهياكل أيضًا. يمكن لهذه الكائنات الحية أن تنطلق في مرحلة يرَقاتها التي تتميَّز بالعيش المستقلِّ في الموانئ الأجنبية، ثم تستقر في القاع، مما يسمح لها باستعمار مواقع جديدة.

عادةً ما يبقى القليل جدًّا من الكائنات الدخيلة على قيد الحياة في بيئاتها الجديدة. غير أن بعضها يُصادف ظروفًا تُمكِّنه من الاستقرار جيدًا، بل واجتياح المجتمع البحري الطبيعي في المنطقة في بعض الأحيان. قد يكون هذا بسبب غياب المفترسات، أو مسببات الأمراض، أو الطفيليات التي تُهاجم الكائن الدخيل في موقعه الجديد، الأمر الذي يُبقي عادةً على أعدادها في المعدَّلات الآمنة. كما قد تُتاح له إمداداتٌ غذائية ذات وفرةٍ غير معهودة، أو يمتلك القدرة على منافسة الأنواع المحلية على الغذاء والموئل. إن أمثلة الكائنات البحرية الدخيلة كثيرةٌ جدًّا وتشمل أنواعًا مختلفة من الأعشاب البحرية، وقناديل البحر، والإسفنج، والديدان، وسرطانات البحر، والبرنقيلات، ونجوم البحر، والحلزونات الصدفية، وبلح البحر، والمحار، والقواقع، والأسماك، وغيرها الكثير.

يُعد إدخال حيوان يُشبه قنديل البحر، وهو القنديل المشطي «نيميوبسيس ليدي»، من المياه الساحلية لأمريكا الشمالية إلى البحر الأسود عبر مياه الصابورة في ثمانينيَّات القرن العشرين مثالًا يوضح جيدًا الدمار الذي يمكن أن تُسببه الكائنات البحرية الدخيلة. فسرعان ما تضاعفَت أعدادُ هذا الحيوان كالطاعون في بيئة البحر الأسود الخالية من المفترسات ليستهلك بنهمٍ العوالقَ الحيوانية الطبيعة في البحر، وقد شمل هذا الاستهلاكُ البيضَ والأسماك في مراحل نموِّها المبكرة. أدَّى ذلك إلى انهيار مخزون الأسماك في أوائل التسعينيَّات، مما تسبَّب في تكبُّد خسائرَ اقتصاديةٍ كبيرة في المنطقة، كما اختفت الدلافين التي تتغذَّى على هذه الأسماك. ومن اللافت أن الأمر تطلب انتقال نوعٍ سامٍّ آخرَ من أنواع القناديل المشطية، «بيرويو أوفاتا»، عن طريق مياه الصابورة أيضًا، للتخفيف من وطأة هذه الكارثة البيئية. في نحو عام ١٩٩٧، بدأ هذا النوع في الازدهار في البحر الأسود، متغذيًا بكثافةٍ على النوع الدخيل الأول، مما تسبَّب في انخفاضٍ حادٍّ في أعداده. ثم قُضي على قناديل «بيرويو أوفاتا» نتيجةَ استنفادها مصدرَ غذائها. ومنذ ذلك الحين، استُعيد مخزون الأسماك وعادت الدلافين.

يُعد اجتياح نجم البحر الياباني «أسترياس أمورينسيس» للمياه في أستراليا مثالًا جيدًا آخرَ على التأثير الكبير الذي يمكن أن تُلحقه الأنواع الغريبة عند غزوها موئلًا جديدًا.

موطن هذا النوع من نجوم البحر هو المياه الساحلية لليابان، وشمال الصين، والكوريَّتين الشمالية والجنوبية، وروسيا، غير أنه قد انتقل في وقتٍ ما في ثمانينيَّات القرن العشرين إلى تسمانيا، ربما في طَور اليرقة عبر مياه الصابورة أو ربما قد التصق في سنٍّ مبكرة بهياكل السفن القادمة من شمال المحيط الهادي.

تفاقمَت أعداد هذا النوع من نجوم البحر في موقعه الجديد، ووصلت بحلول منتصف التسعينيات إلى كثافاتٍ غير عادية في بعض الأماكن. على سبيل المثال، في مصبِّ نهر ديروينت في تسمانيا هناك نحو ٣٠ مليون نجم بحر من هذا النوع بكثافاتٍ تصل إلى ١٠ نجومِ بحرٍ في كل متر مربع واحد. هذا النوع من نجوم البحر هو من المفترِسات الشرهة؛ إذ يتغذى تقريبًا على أي شيء في طريقه، بما في ذلك المحاريات، وسرطانات البحر، وقنافذ البحر، وزقَّاقات البحر، ونجوم البحر الأخرى، ويُحوِّل القاع إلى استزراع أحادي افتراضي من نجوم البحر الدخيلة. كما يُشكِّل هذا النوعُ تهديدًا لعمليات تربية الأحياء المائية في المنطقة مع احتمالية التسبُّب في هلاك مزارع بلح البحر، والمحار، والأسقلوب.

بمجرد ترسُّخ هذه الكائنات الدخيلة يصبح من المستحيل القضاءُ عليها. فقد بُذلَت محاولات للسيطرة على انتشار نجم البحر الياباني عن طريق تجنيد غوَّاصين لإزالته يدويًّا، أو بمحاصرته، أو بصيده. كما حُصد لأغراضٍ تجارية وحُوِّل إلى سماد. غير أن أيًّا من ذلك لم يُحقِّق نجاحًا كبيرًا في استعادة النظام البحري الطبيعي في المنطقة. وتُركز الجهود الآن على الحد من انتشار النوع من خلال حملةٍ توعيةٍ تُشجِّع على الإبلاغ بالمشاهدات المحلية، والتي يتابعها برنامجٌ سريع الاستجابة لاستئصال النوع من المنطقة.

تُبذل جهودٌ دولية للحدِّ من انتشار الأنواع البحرية الغريبة في مياه الصابورة. فمن المفترض أن تُفرِّغ السفنُ خزَّانات الصابورة ثم تُعيد ملئها في المحيط المفتوح قبل الوصول إلى الميناء. السبب وراء ذلك هو أن الكائنات المتجولة العالقة في مياه الصابورة التي تنتقل من الميناء ستُطلَق في المحيط المفتوح حيث لا يمكنها البقاءُ على قيد الحياة، وأن الكائنات العالقة المنتقلة من المحيط المفتوح ستُطلَق في المياه الساحلية للميناء التالي حيث لن تكون الظروف مناسبةً للبقاء على قيد الحياة. تشترط دولٌ كثيرة أيضًا معالجةَ مياه الصابورة بنظامٍ على ظهور السفن؛ لإزالة الكائنات الحية أو قتلها قبل تصريفها في الموانئ. يمكن أن يشمل ذلك معالجاتٍ باستخدام الترشيح، أو الحرارة، أو المطهرات، وعادةً ما يكون بالجمع بين هذه الوسائل.

الحطام البلاستيكي

على مدار الستين عامًا الماضية، أصبحت الموادُّ البلاستيكية، المشتقة من النفط والغاز، من المنتجات الواسعة الانتشار التي لا غنى عنها في المجتمع البشري، ومصدرًا رئيسيًّا للنُّفايات البشرية. ففي عام ١٩٦٧، كان يُنتَج نحوُ مليوني طن من البلاستيك سنويًّا؛ وقد أصبح الإنتاج الحاليُّ نحو ٣٨٠ مليون طن في العام. ووَفقًا للتقديرات، فإن البشر أنتَجوا ما مجموعُه نحوُ ٨٫٣ مليارات طن من البلاستيك حتى يومنا هذا، وهو ما يزيد على ثلاثة أرباع ما طُرِح، وانتهى به الأمر في مدافن النُّفايات أو تراكم في البيئة الأوسع نطاقًا.

ليس من المستغرَب دخولُ كميات هائلة من هذه النُّفايات البلاستيكية إلى البيئة البحرية، بمعدَّلٍ يبلغ نحو ١٠ ملايين طن في السنة حاليًّا. يأتي ما يقرُب من ٨٠ في المائة من الحطام البلاستيكي البحري من اليابسة، وذلك إما مباشرةً أو عبر الأنهار. فهناك ١٠ أنهار؛ اثنان منها في أفريقيا، والباقي في آسيا، تُصرِّف نحو ٩٠ في المائة من مجموع الحطام البلاستيكي البحري. كما تُمثل السفنُ والقوارب مصدرًا آخر من مصادر التلوث بالحطام البلاستيكي البحري. والسبب في ذلك إلقاءُ السفن التجارية والترفيهية وقوارب الصيد مجموعةً كبيرة ومتنوعة من القمامة البلاستيكية، أو فقدانها كمياتٍ كبيرةً من مُعدَّات الصيد من صنَّارات، وعوامات، وشِباك.

إحدى المشكلات الرئيسية للحطام البلاستيكي هي استمراريته في البيئة. فالمواد البلاستيكية، التي يُقدرها البشر لصلابتها ومتانتها، تتحلَّل ببطءٍ شديد، وسيستمرُّ معظمها في البيئة مئات السنين. وهكذا أصبحَت المحيطات عرضةً لتراكم النُّفايات البلاستيكية لأكثر من نصف قرن. أصبح الآن وجود الحطام البلاستيكي شائعًا في كل مكان في المحيطات؛ إذ تجده طافيًا على السطح وعالقًا في عمود الماء، ومتراكمًا في جميع الدوامات المحيطية الخمس التي تميل، بسبب حركتها الدائرية، إلى محاصرة الحطام العائم، كما يستقرُّ في أرضية المحيط في جميع الأعماق ويتناثر على جميع السواحل. وبمرور الوقت، يتحلَّل الحطام البلاستيكي ليصير شظايا من «الجسيمات البلاستيكية» الدقيقة العالقة في المحيطات ثم يغوص ببطءٍ شديد إلى أرضية المحيط.

تُعد كميةُ الحطام البلاستيكي العالقة على الشواطئ في جميع الأنحاء أمرًا مروعًا. ففي المملكة المتحدة هناك في المتوسط أكثرُ من سبعة آلاف قطعةٍ من البلاستيك على طول كيلومتر واحدٍ من الشاطئ، وفي منطقة البحر الكاريبي يوجد عددٌ من القِطَع يتراوح من ١٩٠٠ إلى أكثر من ١١ ألف قطعة، وفي إندونيسيا أكثر من ٢٩ ألفًا. وتُظهِر الدراسات

الاستقصائية لقاع البحار في المناطق الساحلية أنه عادةً ما توجد مئاتُ القطع من الحطام البلاستيكي في الكيلومتر المربع الواحد، وفي بعض الأماكن في إندونيسيا ومنطقة البحر الكاريبي يمكن أن توجد آلاف القطع البلاستيكية في كل كيلومتر مربع.

أُجريت دراسة استقصائية على كمية الحطام البلاستيكي العائم في المحيطات على مدار ٢٤ رحلة بحثية نُظِّمت بين عامَي ٢٠٠٧ و٢٠١٣ عبر جميع الدوامات المحيطية الخمس، وعلى طول المناطق الساحلية لأستراليا، وفي خليج البنغال والبحر الأبيض المتوسط. باستخدام البيانات التي جرى جمعها، قُدِّر وجود أكثر من خمسة تريليونات قطعةٍ من البلاستيك تزن أكثرَ من ٢٥٠ ألف طن طافية على سطح المحيطات. فالشِّباك التي تسحبها السفن تحصد بانتظام من ألف إلى ١٠٠ ألف قطعة بلاستيكية في كل كيلومتر مربع من سطح المحيط، وفي بعض الأحيان تستخرج أكثرَ من ذلك بكثير. ومعظم البلاستيك الموجود في المحيطات — نحو ٩٢ في المائة — عبارةٌ عن جُسيمات بلاستيكية دقيقة بحجمٍ يقلُّ عن ٤٫٧٥مم.

يُشكِّل الحطام البلاستيكي ضررًا بالغًا على العديد من أشكال الحياة البحرية التي تظنُّه طعامًا وتبتلعه أو تعلق فيه. فقد رُصِد تأذِّي مئات الأنواع المختلفة من جرَّاء الحطام البلاستيكي، بما في ذلك الطيور البحرية مثل البطاريق، وطيور القطرس، والبجع، والعديد من طيور الشاطئ، وكذلك الثدييات البحرية بما في ذلك الحيتان، والفقمات، وأسود البحر، وثعالب البحر، وأسماك القرش، وخراف البحر، والأُطُم، والسلاحف. وعادةً ما يحدُث التشابك بسببِ ما يُلقى في البحار من شِباك وحبال الصيد، وخيوط الصيد الأحادية النسيج، وأشرطة ربط الحُزَم، وحلقات حَمل العبوات المكونة من ستِّ فتحات. عادةً ما تلتهم الطيور البحرية والسلاحف الحطام البلاستيكي بجميع أشكاله جميع الأنواع؛ إذ ربما تظنه أشياءَ صالحة للأكل. فالسلاحف على سبيل المثال يبدو أنها تخلط بين الأكياس البلاستيكية وقناديل البحر التي هي إحدى فرائسها. يمكن أن يؤدِّي ابتلاع البلاستيك إلى انسداد الأمعاء والموت، كما يمكن أن تتسرَّب المواد الكيميائية السامة من المواد المُبتلَعة وتتسبب في آثارٍ ضارة أخرى. كما وُجِدت الجسيمات البلاستيكية الدقيقة أيضًا في أمعاء وأنسجة العوالق الحيوانية، بما في ذلك مجذافيات الأرجل. ومما يدعو إلى القلق أن الجزيئات البلاستيكية يُعثر عليها الآن في الأطعمة البحرية التي يأكلها البشر، بما في ذلك سمك القد، وسمك الحدوق، والماكريل، والمحاريات. لا يزال تأثيرُ تناول الأطعمة البحرية الملوَّثة بالبلاستيك على الإنسان محلًّا للجدل، على الرغم من تحذير الهيئة

الأوروبية لسلامة الغذاء في عام ٢٠١٦ من تزايُد الخطر المحتمل على سلامة الغذاء وصحة الإنسان.

إن حجم أزمة الحطام البلاستيكي مروع، ولكن لحسن الحظ هناك مستوًى سريع النمو من الوعي المجتمعي والاهتمام بهذه القضية، كما تكتسب المبادرات الهادفة لمعالجة المشكلة زخمًا. فثمة اتفاقٌ عام على وجوب السعي إلى نهج متعدِّد الجوانب يشمل كلًّا من الحكومات، والمنظمات غير الحكومية، وقطاع الصناعة في جميع أنحاء العالم، ويشمل ذلك: تحسين أنظمة جمع النُّفايات، لا سيما في الدول الفقيرة؛ للحدِّ من تسرُّب المواد البلاستيكية من اليابسة إلى المحيطات، وزيادة نسبة المواد البلاستيكية التي يُعاد تدويرها إلى منتجات بلاستيكية يمكن إعادة استخدامها زيادةً كبيرة، والحد من كمية المنتجات البلاستيكية الجديدة الصُّنع، وإيقاف الطلب على المواد البلاستيكية من خلال مبادرات مثل حظر استخدام الأكياس البلاستيكية التي تُستخدم مرةً واحدة، وتقليل استخدام البلاستيك في تصنيع عبوات الأغذية، إضافةً إلى إزالة الحطام البلاستيكي من الأنهار قبل وصوله إلى المحيطات، وإزالة الحطام البلاستيكي الذي وصل بالفعل إلى البيئة البحرية لتقليل ضرره المستمرِّ على الكائنات البحرية ومنعه من التفكُّك إلى جسيماتٍ بلاستيكية دقيقة أكثرَ ضررًا، ويتعذر إزالتها.

أطلقت منظمة ذا أوشين كلين أب، وهي منظمة غير رِبحية، خطةً طَموحة للحدِّ بشكل كبير من الحطام البلاستيكي المتركِّز في تيار شمال المحيط الهادي، الذي يُشار إليه عادةً برُقعة النُّفايات الضخمة في المحيط الهادي. وقد نُشرت أول نسخةٍ تجريبية من نظام التجميع الخاص بالمنظمة في التيار للاختبار في أواخر عام ٢٠١٨. يتكوَّن النظام من أنبوبٍ عائم على شكل حرف U بطول ٦٠٠ متر تتدلَّى منه تنورةٌ بعمق ثلاثة أمتار. تنقل الرياح والأمواج تلقائيًّا البلاستيك العائم عند السطح أو تحته مباشرةً إلى داخل مركز النظام حيث يتركَّز. وتُصنع التنورة من المواد الملساء التي لا يمكن اختراقها بحيث لا يمكن محاصرةُ العوالق فيها، ويمكن للأسماك أن تسبح تحتها. كما نُشرت نسخةٌ معدَّلة من نظام التجميع هذا صُمِّمَت لجمع البلاستيك بشكلٍ أكثرَ فعالية في منتصف عام ٢٠١٩ لاختبار النظام بشكلٍ أفضل وهي الآن تؤدي مهمةَ جمع البلاستيك بنجاح. وتُخطط ذا أوشين كلين أب الآن لبناء أسطولٍ من نحو ٦٠ نظامًا بالحجم الكامل ونشره، وتزويده بسفن لإزالة البلاستيك من الأنظمة كل بضعة أشهر وإعادته إلى الأرض لإعادة التدوير. تُقدِّر المنظمةُ أن هذه الأنظمة من شأنها إزالة ٥٠ في المائة من البلاستيك الموجود

في رقعة النُّفايات الضخمة في المحيط الهادي في غضون خمس سنوات. غير أنه كي تحظى مشكلة البلاستيك البحري بالمعالجة الوافية؛ فإن أنظمة التنظيف هذه ينبغي أن تكون جزءًا من مجموعةٍ أوسعَ من المبادرات التي تهدف إلى وقف تدفُّق البلاستيك من اليابسة إلى المحيطات.

الفصل الرابع

الأحياء البحرية في القطبين

توجد الأنظمة البيولوجية البحرية المعروفة بازدهارها في البيئات القاسية بالمنطقتَين القطبيتَين الشمالية والجنوبية من كوكب الأرض. تتميز كلتا هاتين المنطقتين بدرجات الحرارة الدائمةِ البرودة، والمحيطات المغطَّاة بالجليد، والتقلُّبات الموسمية العنيفة في مستويات الضوء. غير أنه من نواحٍ أخرى كثيرة، تختلف كِلتا المنطقتين اختلافًا كبيرًا فيما بينهما، وقد تطورَت فيهما أنظمةٌ بيئية بحرية تتمتع بالاختلاف المذهل والتفرُّد.

الحياة البحرية في المحيط المتجمِّد الشمالي

المحيط المتجمِّد الشمالي هو كتلةٌ صغيرة نسبيًّا (نحو ١٥٫٦ مليون كيلومتر مربع)، ومنعزلة من مياه البحر، وذات مساحات شاسعة من الرفوف القارية الضحلة. وهو محاطٌ على مساحة كبيرة بكتلٍ أرضية ذات منفذَين فقط، وهما مضيق بيرينج الضيق للغاية الذي يصل إلى المحيط الهادي والذي يبلغ عمقه ٧٠ مترًا فقط، ومضيق فرام الأوسع بعمق ٤٠٠ متر الذي يصل إلى المحيط الأطلنطي. تصبُّ عدةُ أنهار كبيرة في سيبيريا وكندا في المحيط المتجمِّد الشمالي، مكوِّنةً طبقةً رقيقة من مياه البحر المنخفضة الملوحة بعمقٍ يتراوح من نحو ٢٠ إلى ٥٠ مترًا، تطفو فوق مياه البحر الأكثر ملوحة وكثافة أسفلها. وللمساحات الشاسعة للمحيط المتجمد الشمالي قاعٌ رسوبي ناعم، نتَج عن تصريف كميات كبيرة من الرواسب من هذه الأنظمة النهرية.

يكون سطح المحيط المتجمِّد الشمالي عند نقطة تجمُّد مياه البحر (−١٫٩ درجة مئوية) أو بالقرب منها، معظمَ أيام السنة. ومن ثَم فإن جزءًا كبيرًا من المحيط مغطًّى دائمًا بغطاءٍ عائم من الجليد البحري يتوسَّع ويتراجع مع التغيُّر في فصول السنة. فيكون

الغطاء في أقصى درجات توسُّعه في شهر أبريل في نهاية فصل الشتاء القطبي الشمالي ويشهد أقلَّ توسعٍ له في سبتمبر في نهاية الصيف القطبي الشمالي. ويحدث الذوبان الصيفي في الغالب فوق الرفوف القارِّية الشاسعة للمحيط المتجمد الشمالي، بينما تظل معظم الأجزاء الباقية للمحيط مغطاةً بالجليد طَوال العام. فقد قاوم هذا الجليدُ البحري الذي تكوَّن على مدار عدة سنوات الذوبانَ الكامل للعديد من الأعوام، ويبلغ سُمكه من ثلاثة إلى أربعة أمتار. أما الأجزاء الباقية فهي من جليدٍ أرقَّ بعمر العام؛ إذ يبلغ سُمكه من قرابة متر إلى مترين.

قد يتوقَّع المرء أن تكون هذه المساحة الهائلة من مياه البحر المتجمدة خاليةً من الحياة. غير أنها تضمُّ في الواقع مجتمعًا وفيرًا ومتنوعًا من الحياة البحرية، تنفرد بها البحارُ القطبية وحدها، والتي تلعب دورًا أساسيًّا في الحفاظ على الشبكة الغذائية القطبية. يتميَّز الجليد البحري بكونه صالحًا للعيش لأنه عالي المسامية بدرجةٍ كبيرة، على عكس جليد المياه العذبة الصُّلب. وعندما يتشكل الجليد البحري، تمتلئ المسافات الصغيرة بين بلورات الجليد بمحلولٍ عالي الملوحة مقاومٍ للتجمُّد. ومن خلال هذه العملية تتكوَّن داخل الجليد البحري شبكةٌ ثلاثية الأبعاد من قنوات ومساحات المياه المالحة التي تتراوح أحجامها من أحجامٍ مجهرية إلى بضعة سنتيمترات. وتتصل هذه القنوات فيزيائيًّا بمياه البحر تحت الجليد.

خلال فصلَي الخريف والشتاء، تصبح الفيروسات، والبكتيريا، والعتائق، والطلائعيات في مياه البحر مدمجةً في الجليد البحري المتزايد نحو الأسفل. يوجد داخل الجليد كميةٌ كبيرة من الإنتاج الأولي في المحيط المتجمِّد الشمالي، ربما تصل إلى ثلثِ الكمية الموجودة في تلك المناطق التي يُغطيها دائمًا الجليد البحري. في فصلَي الربيع والصيف في القطب الشمالي، يخترق ما يكفي من الضوء الثلجَ الذي يُغطي الجليد، والجليدَ نفسه؛ للحفاظ على الإنتاج الأولي عبْر بكتيريا البناء الضوئي، وطحالب الدياتوم، والسوطيات الدوارة الموجودة داخل القنوات المالحة، وكذلك في طبقةٍ جليدية تُغطي القاع. سرعان ما تصبح هذه الكائنات الحية وفيرةً لدرجةٍ تُحيل معها الجليدَ إلى اللون البُني (انظر شكل ٤-١). يوفِّر الجليد البحري موئلًا بحريًّا مستقرًّا بشكلٍ فريد يحافظ على هذه الكائنات داخل الطبقة المضاءة في جميع الأوقات خلال فصل الصيف، وهو ما يزيد بدوره من الإنتاجية الأولية.

يوجد مجتمع ميكروبي متطوِّر في الجليد البحري يشبه في آلية عمله الحلقةَ الميكروبية لمنطقة البحر المفتوح في المحيط (انظر الفصل الثاني). فالبكتيريا الذاتية التغذية، إلى

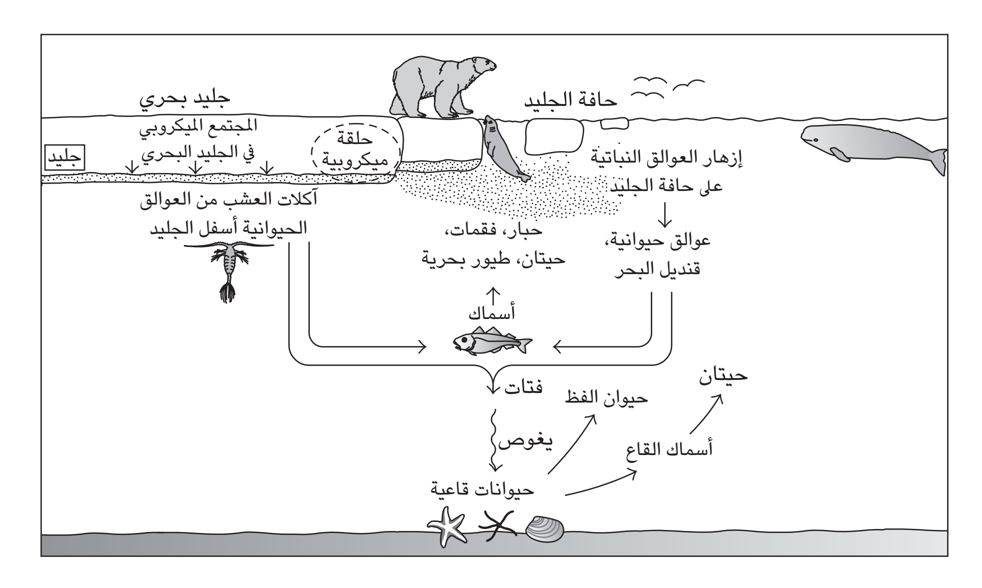


شكل ٤-١: عينة جليد أسطوانية قُطرها مترٌ واحد، تُظهر اللون البني المميز للكائنات الحية في الجليد.

جانب البكتيريا الغيريَّة التغذية التي تتغذى على المواد العضوية الذائبة، تأكلها الطلائعياتُ السوطية الوفيرة، التي تصبح بعد ذلك غذاءً للطلائعيات المُهدَّبة الأكبرِ حجمًا.

تحتشد العوالق الحيوانية الكبيرة، مثل مُزدوِجات الأرجل ومجذافيَّات الأرجل، على السطح السُّفلي للجليد، وتأوي إلى القنوات المالحة، حيث تتغذى على الهدبيات والكائنات الكبرى التي تقوم بالبناء الضوئي؛ مثل طحالب الدياتوم والسوطيات الدوارة. توفِّر آكلاتُ العشب الكبرى هذه رابطًا رئيسيًّا بمستويات التغذية العُليا في الشبكة الغذائية للقطب الشمالي (انظر شكل ٤-٢). وهي مصدرٌ غذائي مهم للأسماك مثل سمك القد القطبي الذي يتغذَّى على طول قاع الجليد. هذه الأسماك بدورها يتغذَّى عليها الحبَّار، والفقمات، والحيتان. وتمثِّل الفقمات مصدرًا مهمًّا للغذاء لما يقرُب من ٢٥ ألف دبٍّ قطبي يعيش

حاليًّا في منطقة القطب الشمالي. تبرَع الدِّببة القطبية في قتل الفقمات عندما تخرج من فتحات تنفُّسها في الجليد، أو عندما تجذب نفسها إلى أعلى على حافة الجليد.



شكل ٤-٢: تمثيلٌ للشبكة الغذائية في القطب الشمالي.

خلال فصل الصيف عندما تبدأ حافة الجليد البحري في الذوبان، فإن الكائنات التي تقوم بالبناء الضوئي والتي تعيش في الجليد تُطلَق جزئيًّا في مياه البحر، وتُشكِّل نَواةً لإزهار العوالق النباتية تحت الجليد. مع تقدُّم الصيف وانهيار حافة الجليد وتراجعها، يُكوِّن هذا الإزهار منطقةً بعرضٍ يتراوح من ٢٠ إلى ٨٠ كيلومترًا من الإنتاجية الفائقة عند حافة الجليد. وتزدهر أعداد حيوان الفظ، والفقمات، وحَريش البحر، والحوت الأبيض، والحيتان المقوَّسة الرأس في هذه الحدود المحيطية مع الطيور البحرية والدِّببة القطبية. يتبع هذا المجتمع حافةَ الجليد لمئات الكيلومترات أثناء تراجعه شمالًا خلال صيف القطب الشمالي.

تغوص المواد العضوية غير المستهلَكة الناشئة عن هذا الإزهار المكثَّف في القطب الشمالي في قاع المحيط، وتدعم مجتمع قاع القطب. تعيش الكائنات القاعية، مثل مزدوجات الأرجل، والديدان، والحلزونات الصدَفية، ونجوم البحر الهشة على رواسب القاع اللينة أو

بداخلها في المحيط المتجمد الشمالي، وهي شائعةٌ بصفة خاصة في الرفوف القارية؛ حيث تتغذَّى على الأسماك التي تتغذى من القاع، أو بالقرب منه، مثل الإيلبوت والإسقلبينينات، وكذلك تتغذى عليها الحيتان الرمادية وحيوانات الفظ التي تبحث عن طعامها في قاع البحر.

نتيجةً لتغيُّر المناخ الذي يتسبب فيه الإنسان؛ تتعرَّض المنطقة القطبية الشمالية للاحترار، وذلك بمعدَّلٍ أسرعَ مما يحدث في بقية الكوكب. ولهذا تأثيرٌ كبير على الغطاء الجليدي في المحيط المتجمِّد الشمالي. فأحد المنعطفات العنيفة هو التناقص التدريجي في السُّمك الإجمالي للجليد البحري حيث انخفض من متوسط ٣٫٦٤ أمتار في عام ١٩٨٠ إلى ١٫٨٩ متر في عام ٢٠٠٨. قبل أواخر سبعينيَّات القرن العشرين، امتد الجليد البحري في القطب الشمالي إجمالًا إلى ما يقرُب من ١٥٫٦ مليون كيلومتر مربَّع في أواخر الشتاء. غير أن أقصى امتدادٍ للجليد البحري في فصل الشتاء شهده المحيط المتجمد الشمالي؛ قد انخفض بمتوسط ثلاثةٍ في المائة في العَقد الواحد منذ عام ١٩٧٩، كما انخفض بمعدَّلٍ أسرعَ بكثير في السنوات الأخيرة؛ إذ نقَص الآن إلى نحو ١٤٫٤ مليون كيلومتر مربع. كما يشهد أدنى امتداد للغطاء الجليدي الصيفي معدَّلاتٍ أسرعَ في الانخفاض. ففي العادة يمتدُّ الجليد البحري في القطب الشمالي ليصل إلى أكثرَ من سبعة ملايين كيلومتر مربع في نهاية الصيف. ولكن على مدار العَقد الماضي، لم يتجاوز أدنى امتدادٍ للجليد البحري المعدَّل من ٣٫٥ إلى خمسة ملايين كيلومتر مربع. بهذا المعدَّل، سيُصبح المحيط المتجمد الشمالي خاليًا تقريبًا أو تمامًا من الجليد لعدة أشهر في السنة قبل عام ٢٠٤٠، وربما خلال العَقد القادم.

من الواضح أن المحيط المتجمد الشمالي كما عرَفناه على وشْك أن يختفيَ مع الآثار الجسيمة التي تلحق بالحياة البحرية فيه. على سبيل المثال، سيزداد إجماليُّ الإنتاج الأوَّلي بشكل كبير؛ لأن تقلُّص حجم الغطاء الثلجي والجليد يعني زيادةً في عمق الطبقة المضاءة، كما سيختفي جزءٌ كبير من المجتمع الميكروبي في الجليد البحري في فصل الصيف. من شأن هذه التغييرات وحدها أن تؤثِّر جذريًّا على الشبكة الغذائية في القطب الشمالي. علاوةً على ذلك، ستُصبح الفقمات والدببة القطبية بوجهٍ خاص، التي ترتبط حياتها ارتباطًا وثيقًا بالجليد البحري، أكثرَ تضررًا حيث سيتقلص حجمُ موائل غذائها وتكاثرها بشكل كبير.

كما تغيب حاليًّا مصايد الأسماك التجارية عن المحيط المتجمد الشمالي بسبب صعوبة تشغيل سفن الصيد في البحار التي يُغطيها الجليد. إلا أن المحيط المتجمد الشمالي سيصبح

أكثرَ جاذبيةً لأساطيل الصيد التجاري مع الزيادة في تقلص الغطاء الجليدي، ولا سيما أن ارتفاع درجة حرارة المحيط يؤدي إلى حركة بعض أصناف المخزون السمكي المهمة، مثل سمك القد والهلبوت، شمالًا إلى مياه القطب الشمالي. إلا أنه من المُبشِّر أن دول الاتحاد الأوروبي إضافةً إلى تسع دولٍ أخرى قد وافقَت مؤخرًا على وقف الصيد في الكثير من مناطق القطب الشمالي حتى عام ٢٠٣٤ على أقلِّ تقدير. سيُتيح ذلك الوقتَ لفهمٍ أفضل من جانب علماء الأحياء البحرية للتغيُّر في النظام البيئي البحري بالقطب الشمالي، ويؤمل أن يُسهم في تقديم توجيهات بشأن الإدارة المستدامة لمستقبل المنطقة. ستكون أفضلُ نتيجةٍ لذلك هي التوصل إلى اتفاقٍ آخرَ لإعلان المحيط المتجمد الشمالي محميَّةً بحرية دائمة.

الحياة البحرية في المحيط المتجمد الجنوبي

يمكن النظر إلى النظام البحري في المحيط المتجمد الجنوبي باعتباره المقابلَ الجغرافي للنظام البحري في المحيط المتجمد الشمالي. وذلك لأنه على عكس المساحة الشاسعة المحاطة باليابسة في القطب الشمالي، فإن المحيط المتجمِّد الجنوبي يحيط بالكتلة اليابسة للقارَّة القطبية الجنوبية، ويتصل مباشرةً بكلٍّ من المحيط الأطلنطي، والهندي، والهادي. وفي حين أن للأنهار وما تجلبه من موادَّ بالغَ الأثر على المحيط المتجمد الشمالي؛ تخلو القارة القطبية الجنوبية من الأنهار؛ ولذلك تشيع أرضية المحيط ذات القاع الصُّلب في المحيط المتجمد الجنوبي، ولا توجد فيه طبقةٌ سطحية منخفضة الملوحة كما في المحيط المتجمد الشمالي. إضافةً إلى ذلك، فعلى عكس المحيط المتجمد الشمالي ذي الرفوف القارية الشاسعة والضحلة؛ تتميز الرفوف القارية في القارة القطبية الجنوبية بالضيق والانحدار الشديدَين.

عادةً ما يُعد الحدُّ الشمالي التقريبي للمحيط الجنوبي هو خطَّ عرض ٦٠ درجة جنوبًا. ولأن حافة القارة القطبية الجنوبية تقع تقريبًا عند ٧٠ درجة جنوبًا، فإن المحيط الجنوبي عبارةٌ عن حلقةٍ من محيطٍ يمتدُّ على نحو ١٠ درجات من خط العرض، نحو ١١٠٠ كيلومتر.

يغطي القارةَ القطبية الجنوبية صفحةٌ جليدية سميكة تمتد خارجيًّا باتجاه السواحل، ثم إلى المحيط لتُشكِّل كتلةً عائمة شاسعة بسُمك ١٠٠ متر من الجليد الدائم تُسمى الرفَّ الجليدي. وباتجاه البحر من الرف الجليدي يتجمَّد المحيط بشكلٍ موسمي.

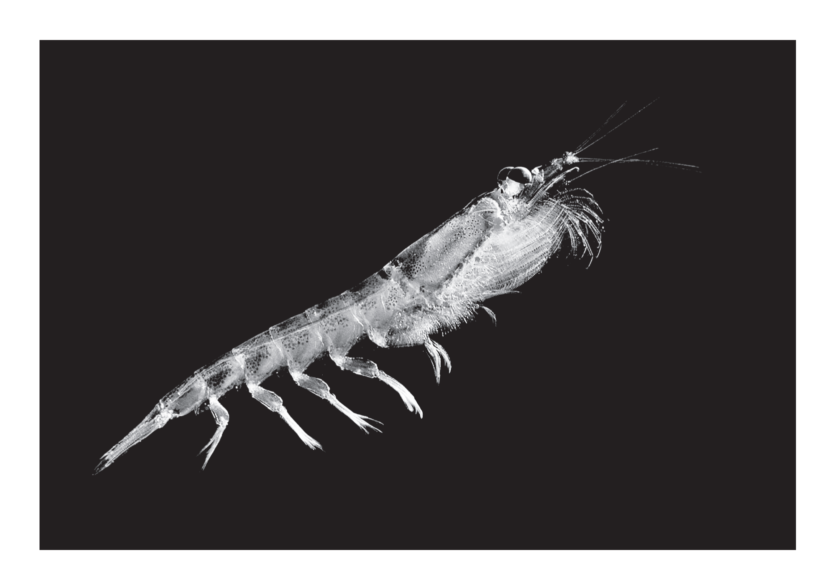
يشهد المحيط الجنوبي تقلباتٍ موسميةً هائلة. ففي بداية فصل الشتاء في نصف الكرة الجنوبي، يبدأ البحر في التجمُّد، وتتحرك الجبهةُ المتجمِّدة للخارج بسرعةٍ بمعدَّلات من عشرات إلى مئات الكيلومترات كلَّ يوم. بنهاية الشتاء في نصف الكرة الجنوبي، يصبح ما يصل إلى ١٨ مليون كيلومتر مربع من المحيط مغطًّى بالجليد البحري. على عكس المحيط المتجمد الشمالي؛ فإن هذا الجليد البحري سيذوب كله تقريبًا خلال الصيف، ولن يتبقى منه سوى مساحةِ ثلاثة ملايين كيلومتر مربع. ولأن معظم الجليد البحري في المحيط الجنوبي لا يتعدى عمره العامَ الواحد؛ فهو أرقُّ نسبيًّا مما هو عليه في المحيط المتجمد الشمالي؛ إذ يبلغ سُمكه عادةً من مترٍ إلى مترين.

تتميَّز مياه القطب الجنوبي بثرائها الفائق في المغذيات، حيث يخصِّبها التيار الصاعد الدائم لمياه البحر القادم من الطرف الآخر للكوكب. فكما أوضحنا في الفصل الأول، تغوص مياه البحر الباردة الكثيفة المتكوِّنة في شمال المحيط الأطلنطي — المياه العميقة لشمال الأطلنطي — وتتدفق ببطءٍ نحو الجنوب بالقرب من قاع حوض الأطلنطي؛ لتظهر بعد مئات السنين قبالةَ ساحل القارة القطبية الجنوبية. هذا التدفُّق المستمر لمياه البحر الباردة والغنية بالمغذيات، إضافةً إلى يوم الصيف الطويل في القارة القطبية الجنوبية، يُهيئ ظروفًا مثالية لنمو العوالق النباتية، التي تقود إنتاجية المحيط الجنوبي.

كما هي الحال في القطب الشمالي، يوجد مجتمعٌ ميكروبي شديد التطور في الجليد البحري. تتميز الكائنات التي تقوم بالبناء الضوئي هنا بأنها أكثرُ وفرةً وإنتاجية عنها في المحيط المتجمد الشمالي؛ لأن الجليد البحري أرق، وهكذا فإن ثمة المزيدَ من الضوء اللازم لعملية البناء الضوئي. فطحالب الدياتوم يمكن أن تشهد وفرةً خاصة، وعندما يتفكَّك الجليد البحري وينحسر في الربيع، يُطلق في المياه المفتوحة عند حافة الجليد ويُشكِّل نواةً لإزهارٍ ضخم في طحالب الدياتوم.

يدعم هذا التدفقُ الهائل في الإنتاج الأولي أهمَّ الأنواع البحرية في المحيط الجنوبي، وهو الكريل القطبي الجنوبي «يوفاوزيا سوبيربا». الكريل القطبي الجنوبي هو حيوانٌ من العوالق الحيوانية شبيهٌ بالجمبري وشفاف تقريبًا، ويتراوح طوله من نحو أربعة إلى ستة سنتيمترات (انظر شكل ٤-٣). ويمكنه العيش من مدةِ خمس إلى ١٠ سنوات، وبذلك يمكنه البقاء على قيد الحياة خلال فصول الشتاء الطويلة والمظلمة المتعاقبة في القطب الجنوبي، عندما تغيب العوالقُ النباتية ويندُر وجود الموادِّ الغذائية الأخرى. فأثناء أشهر الشتاء، يُقلل من معدَّل تمثيله الغذائي، ويتقلص في الحجم، ويعود إلى مراحلِ نموه

المبكرة. وعندما يرجع الطعام إلى وفرته في الربيع، ينمو سريعًا ويُعيد تطوير خصائصه الجنسية.

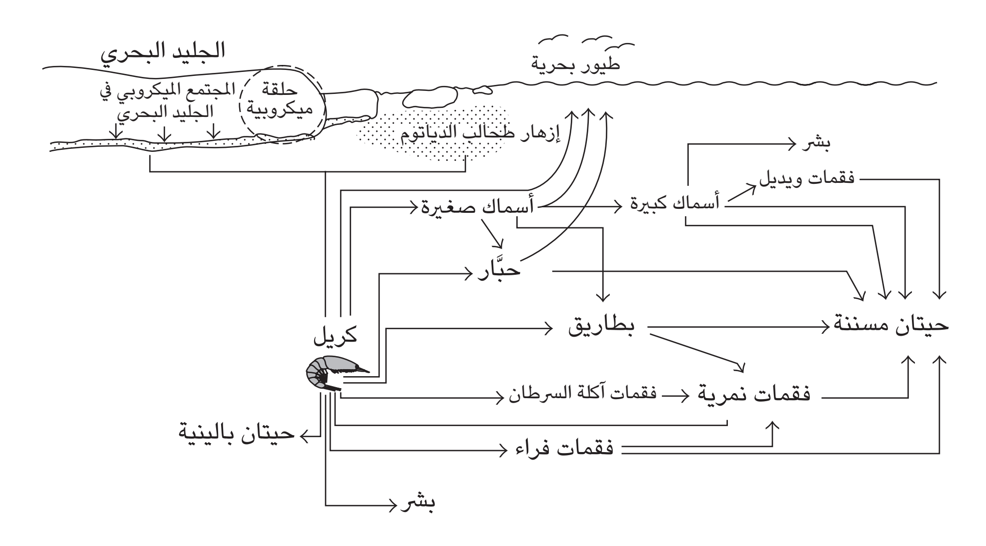


شكل ٤-٣: الكريل القطبي الجنوبي.

في ربيع القطب الجنوبي، يزحف الكريل تحت الجليد البحري ويتغذَّى على العشب الوافر للكائنات الدقيقة التي تقوم بعملية البناء الضوئي. وعندما يتكسَّر الجليد البحري، يترك الكريل الجليد ويبدأ في التغذية المباشرة على كتلة الإزهار الضخمة لطحالب الدياتوم الطليقة، وذلك باستخدام زوائد التغذية بالترشيح. ومع توفُّر الكثير من الطعام، ينمو ويتكاثر سريعًا، ويبدأ في التجمُّع بأعداد كبيرة، غالبًا بكثافةٍ تزيد على ١٠ آلاف فرد في كل متر مكعب، وهي كثافة كافية لإكساب مياه البحر باللون البُني المحمر.

يُشكِّل الكريل أسرابًا ذاتَ أفراد متفرقة وتتفاوت كثيرًا في أحجامها من بعضها الذي من شأنه أن يكون شديد الصغر — والذي يبدو مجردَ رُقع من بضعة أمتار مربعة عند النظر لأسفل على سطح المحيط — إلى تلك التي تشغَل مساحاتٍ تبلغ مئات الكيلومترات المربعة وتضمُّ ملايين الأطنان من الكريل. ولأن المحيط الجنوبي يُغطي مساحةً كبيرة؛ فإن أعداد الكريل فيه هائلة، حيث تُقدَّر بنحو ٦٠٠ مليار حيوان في المتوسط، أو نحو

٥٠٠ مليون طن من الكريل. هذا يجعل الكريل القطبي الجنوبي أحدَ أكثرِ أنواع الحيوانات وفرةً على الكوكب من حيث العددُ الإجمالي والكتلة الحيوية. على سبيل المقارنة، يبلغ تَعداد الجماعات البشرية الآن نحو ٧٫٣ مليارات، بإجمالي كتلة حيوية تُعادل تقريبًا الكتلةَ الحيوية للكريل في القطب الجنوبي. ليس من المستغرب إذن أن يلعب الكريل دورًا محوريًّا في النظام البحري للمحيط الجنوبي. فهو تقريبًا مصدرُ غذاء أساسي لجميع الحيوانات البحرية في المحيط الجنوبي، بما في ذلك الأسماك، والحبَّار، والفقمات النمرية، وفقمات الفراء، والفقمات الآكلة السرطان، والبطاريق، والطيور البحرية، والحيتان البالينية. وهو بذلك رابطٌ رئيسي في سلسلةٍ غذائية قصيرة وذات كفاءة عالية من خطوتين أو ثلاث خطوات (انظر شكل ٤-٤).



شكل ٤-٤: تمركُز الكريل القطبي الجنوبي في الشبكة الغذائية للمحيط الجنوبي.

يوجد الحوت الأزرق، والحوت الحقيقي، والحوت الزعنفي بكثرةٍ في المحيط الجنوبي خلال فصل الصيف. لهذه الحيتان صفائحُ بالينية شبيهة بالمنخل في أفواهها تستخدمها لالتقاط كميات كبيرة من الكريل. فهي ترتشف كميات كبيرةً من مياه البحر المليئة بالكريل، ثم تستخدم ألسنتها لدفع مياه البحر للخروج عبر مناخل البالين، التي تحتفظ بحيوانات الكريل.

جميع أنواع الحيتان في المحيط الجنوبي هي من الحيتان المهاجرة، وتتغذى في المحيط الجنوبي خلال فصل الصيف في نصف الكرة الجنوبي، ثم تسبح مسافاتٍ طويلة إلى المياه الشمالية الدافئة لتتكاثر خلال أشهر الشتاء. وفي ربيع نصف الكرة الجنوبي، ترجع إلى الجنوب متتبعةً حافة الجليد المتراجعة.

تعتمد كذلك الفقمات الآكلةُ السرطان، على الرغم من اسمها، على الكريل كمصدرٍ للغذاء. وتتمتَّع هذه الفقمات، التي تعيش على قطع الجليد الطافية، بأسنانٍ خاصة تكيَّفَت لجذب الكريل مباشرةً من المحيط. ومثلها في ذلك مثلُ الحيتان البالينية إلى حدٍّ بعيد، ترتشف ملء أفواهها جرعةً من ماء البحر وتلفظه عبر أسنانها التي تحتفظ بحيوانات الكريل. ليس من المستغرب أنه بفضل الحجم الهائل لمخزونها الغذائي، فإن الفقمات الآكلةَ السرطان تتمتَّع بوفرةٍ كبيرة على الرغم من أن التقديرات الدقيقة لأعدادها لا تزال صعبةَ المنال. يُعتقد حاليًّا أن هناك سبعةَ ملايين حيوانٍ منها على أقل تقدير، وهو ما يجعلها أكثرَ أنواع الفقمات وفرةً على الكوكب.

تعتمد البطاريق في القطب الجنوبي أيضًا في غذائها على الكريل. وأكثر أنواع البطاريق وفرةً في القارة القطبية الجنوبية هو بطريق آديلي. فهناك نحو مليونَين ونصف المليون زوجٍ من أفراده القادرة على التكاثر، والتي تتغذى على الكريل والأسماك الصغيرة. وبإمكانها الغوص إلى أعماقٍ تصل إلى مئات الأمتار بحثًا عن الطعام. تعتمد البطاريق الصغيرة بصورةٍ خاصة على الكريل، وإذا قلَّت أعداد الكريل في أي سنة بعينها، يرتفع معدَّلُ وفَيَات الصغار.

تنتشر المفترسات البحرية الضخمة في المحيط الجنوبي. فالفقمات النمرية هي آكلات لحوم شرهةٌ مزوَّدة جيدًا بالقدرة على التغذية على الفرائس الكبيرة؛ مثل البطاريق، والفقمات آكلة السرطان، وفقمات الفراء. غير أنه يمكنها أيضًا أن تتغذى على الكريل المنتشر في القطب الجنوبي، كما أن بعض أسنانها معدَّلة للعمل مِصفاةً للكريل، مثلها في ذلك مثلُ الفقمات الآكلة السرطان. الحيتان القاتلة، أو الأُوركا، هي نوعٌ شائع آخرُ من مفترسات القطب الجنوبي، وتتغذى على الأسماك، والبطاريق، والفقمات، والحيتان الأخرى، ولكن حتى حيتان الأُوركا تتغذى على الكريل.

ينتشر كذلك العديد من أنواع الحبَّار المختلفة في المحيط الجنوبي، وتُعد مصدرًا غذائيًّا مهمًّا للغاية للحيوانات البحرية الكبيرة، بما في ذلك الحيتان المسننة، مثل حيتان العنبر، والطيور البحرية. يعيش أحد أكبر اللافقاريات على هذا الكوكب، وهو الحبار

الضخم، في المياه العميقة للمحيط الجنوبي. وحتى وقتٍ قريب لم تكن تُرى عينةٌ كاملة من هذا الحيوان؛ فلم يكن يُعرَف سوى من خلال فُتاته الذي كان يُعثر عليه في مَعِدات حيتان العنبر التي كانت تصطادها سفنُ صيد الحيتان. ولكن في عام ٢٠٠٧، جُلب أحد الحبارات الضخمة إلى السطح من عمق نحو ٢٠٠٠ متر في شبكة صيد لإحدى سفن الصيد في أعماق المحيطات آتية من نيوزيلندا. كان طوله ١٠ أمتار ووزنه يقارب ٥٠٠ كيلوجرام. تُظهِر تحليلات المَعِدة أن الحبار الضخم هو الفريسة الرئيسية لحيتان العنبر في المحيط الجنوبي. وقد وُجِد في العديد من حيتان العنبر ندوبٌ على أجسامها، يبدو أنها قد تسبَّبَت فيها الخطافاتُ الحادة الموجودة في أطراف لوامس التغذية الطويلة لدى الحبار الضخم، وهو ما يُمثل دليلًا على الصراعِ القويِّ بين المفترس والفريسة في الأعماق السحيقة الباردة للمحيط الجنوبي.

ومن الأنواع الشائعة الأخرى في القارة القطبية الجنوبية مجموعة غير مألوفةٍ من السمك، وهو السمك الجليدي. هذا النوع من الأسماك، الذي يعيش باستمرارٍ في مياه البحر التي على وشْك التجمُّد، لديه كمية قليلة جدًّا من الصبغة الحمراء الناقلة للأكسجين، الهيموجلوبين، في مجرى الدم، حيث ينتقل الأكسجين في أجسامه في محلولٍ عبر بلازما الدم. ويمكن لهذا النوع من الأسماك الحصولُ على ما يكفي من الأكسجين بهذه الطريقة؛ بفضل البرودة الشديدة للسوائل في أجسامه، حيث تزداد كمية الأكسجين في المحلول مع انخفاض درجة الحرارة. كما يتمتع بقدراتٍ أخرى على التكيف تمنع أجسامه من التجمُّد. على سبيل المثال، تحتوي السوائلُ في أجسامه على بروتينات وسكريات معقَّدة توفر نوعًا من الحماية ضد التجمد عن طريق خفض الدرجة التي يتجمد عندها الجسم.

تنتشر في المحيط الجنوبي مجموعةٌ واسعة من الطيور البحرية، بما في ذلك القطرس، والمازور، وكاسر العظام، وتتغذَّى على الكريل، والحبار، والأسماك. ربما يكون قطرس جوال («ديوميديا إكسولانس») أبرزَ مثال على الطيور البحرية في المحيط الجنوبي. إنه أكبر طيور القطرس، حيث يبلغ طول امتداد جَناحَيه ثلاثة أمتار أو أكثر، ويقضي معظم حياته في الطيران، مُستقِلًّا نظامَ الرياح في المحيط الجنوبي. تنتشر طيور القطرس على مدى آلاف الكيلومترات المربعة من المحيط بحثًا عن الطعام ويمكنها أن تسافر مسافةً تصل إلى ١٠٠٠ كيلومتر في اليوم. وتعود طيور القطرس إلى اليابسة للتكاثر، غالبًا في الجزر تحت القطب الجنوبي.

على الرغم من البرد القارس، فمن شأن المجتمعات القاعية في المحيط الجنوبي التميزُ بثراءٍ استثنائي. في المياه الضحلة التي يقلُّ عمقها عن نحو ١٥ مترًا، يجرف جليد القاع أرضيةَ المحيط باستمرار. تغيب هنا الحيوانات البحرية العالقة، وتحتلُّ القاعَ خلال وقتِ خلوِّه من الجليد حيواناتٌ قادرة على الحركة؛ مثلُ نجوم البحر، وقنافذ البحر، والديدان الخرطومية الكبيرة التي تغزو المنطقة متى تمكَّنَت من ذلك؛ لتتغذى على طحالب الدياتوم التي تنمو على أرضية المحيط، وللنبش عن الحيوانات الميتة والمحتضرة.

في المياه العميقة، تنتشر الحيوانات القاعية العالقة مثل شقائق النعمان البحرية، والمرجان، والإسفنج بأعداد كبيرة. وفي بعض المناطق، تُعد كثافة حيوانات أرضية المحيط هذه من بين الأكبر في معدَّلاتها في أي بيئة بحرية على هذا الكوكب.

لطالما تعرضَت الثدييات البحرية في المحيط الجنوبي لاستغلالٍ مفرط في الماضي. فقد بدأ صيد فقمات الفراء القطبية الجنوبية في أواخر القرن الثامن عشر، وبحلول عام ١٨٣٠ تعرَّضت معظم مستعمرات فقمات الفراء للإبادة أو تقلصَت أحجامها في الأماكن التي لم يَعُد فيها مواصلةُ صيدها أمرًا مُربحًا. وقد أُعلِنت من الأنواع المحمية في عام ١٩٦٤، ويبلغ عددها الآن أكثرَ من خمسة ملايين فرد، وهو ما ربما يكون عددًا أكبرَ مما كانت عليه في بداية استغلالها.

بدأ صيد الحيتان في المحيط الجنوبي في أوائل القرن العشرين، وقد استهدف في البداية الحيتان الحدباء، ثم انتشر سريعًا بين الأنواع الأخرى، بما في ذلك الحوت الحقيقي الجنوبي، والحوت الأزرق، والحوت الزعنفي، وحوت ساي، وحوت العنبر. في السنوات التي سبقَت الحرب العالمية الثانية، كانت عشرات الآلاف من الحيتان تُصاد سنويًّا، وقد سُجِّل نفوق ٦٣١٥١٨ حوتًا في الآونة ما بين عامَي ١٩٥٦ و١٩٦٥. وقد انهارت تلك الصناعة في ستينيَّات القرن العشرين عندما أصبح من غير المُربح اصطيادُ ما تخلَّف من جماعاتها الباقية. بحلول ذلك الوقت، كانت أعداد الحوت الحقيقي الجنوبي والحوت الأحدب قد انخفضَت إلى ما يقرب من ثلاثةٍ في المائة من حجمها الأصلي، كما انخفضت أعداد الحيتان الزرقاء إلى نحوِ خمسة في المائة، والحيتان الزعنفية وحيتان ساي إلى نحو ٢٠ في المائة. دخل وقفُ الصيد التجاري للحيتان حيِّز التنفيذ في عام ١٩٨٧، ولا تُصاد الحيتان حاليًّا فيما عدا في بعض الحالات في اليابان؛ حيث يُعد صيدها ذا قيمة علمية.

عقب الهلاك الذي حلَّ بمجموعات الفقمة والحيتان، انتقل استغلال الأنواع البحرية في المحيط الجنوبي إلى أسفل الشبكة الغذائية؛ لاستهداف الحيوانات الأصغر في المستويات

الغذائية الأدنى. بدأ الصيد التجاري في أواخر ستينيَّات القرن العشرين، وقد ركَّز أولًا على أنواعٍ مثل سمك الماكريل الجليدي. وفي الثمانينيات، بدأت سفنُ الصيد في اصطياد سمك باتاجونيا المسنن باستخدام خيوط الصيد الطويلة التي تصل إلى أعماقٍ أكثرَ من ١٠٠٠ متر. يمكن لهذه السمكة أن تنموَ ليصل طولها إلى أكثرَ من ٢٫٣ متر وقد تزنُ أكثرَ من ١٣٠كجم. تُعرف في الأسواق باسم «سمك القاروس التشيلي»، وقد أصبحَت من الأسماك الذائعة الصيت التي تُباع بأسعارٍ باهظة. سجَّلت حصيلة الصيد حاليًّا نحو ١٢ ألف طن كل عام. في أواخر التسعينيَّات، توسَّع استهداف مصايد الخيوط الطويلة هذه ليشمل نوعًا آخرَ ذا صلة، وهو السمك المسنن، بحصيلةٍ تبلغ حاليًّا أربعة آلاف طن سنويًّا تقريبًا. يمثل السمك المسنَّن غذاءً لحيتان العنبر، والحيتان القاتلة، وفقمات ويديل، والحبار الكبير، ومن ثَم فالقضاء عليه من المحتمل أن يؤثِّر على هذه الأنواع التي تعتمد عليه. وقد تجاوز الطلبُ على الأسماك المسنَّنة العرض، مما أدى إلى الصيد غير القانوني بالسفن التي لم تُخصَّص لها حصةٌ من هذه الأنواع. تبلغ قيمة الصيد غير القانوني مئات الملايين بالدولار الأمريكي سنويًّا، على الرغم من انخفاض كميته في السنوات الأخيرة جراءَ التدابير الإدارية التي نفَّذَتها لجنة حفظ الموارد البحرية الحية في منطقة القطب الجنوبي (CCAMLR).

لم يسلَم حتى الكريل في المحيط الجنوبي من الاستغلال البشري. فقد اصطِيد الكريل بشباكٍ تصل إلى عمق ٢٠٠ متر. وقد بدأ صيد الكريل في القطب الجنوبي في سبعينيات القرن العشرين، وبحلول أوائل الثمانينيات بلغ حصاده السنوي نصف مليون طن. ثم انخفضَت حصيلة الصيد بدايةً من أوائل التسعينيات إلى ما يقرُب من ١٠٠ ألف طن سنويًّا؛ حيث تخلَّت معظم الدول عن مصايد الأسماك بسبب ارتفاع تكلفة تشغيلها في المحيط الجنوبي. غير أن الطلب على الكريل يتزايد من جديد، ومنذ عام ٢٠١٠ أصبحَت حصيلة الصيد تتراوح بين ٢٠٠ ألف طن إلى ٣٠٠ ألف طن في السنة تقريبًا. تُعالج أعدادٌ كبيرة من الكريل بهدف تحويلها إلى وجبةٍ للأسماك، فيصبح أحد مكونات الأعلاف الصناعية المستخدَمة في المزارع السمكية. وفي الآونة الأخيرة، زاد الطلب على الكريل مصدرًا للمُكملات الغذائية الصحية، مثل زيوت أوميجا ٣.

شهدَت أعداد الكريل انخفاضًا ملحوظًا في بعض أجزاء المحيط الجنوبي منذ سبعينيَّات القرن العشرين، ربما بنسبةٍ تصل إلى ٨٠ في المائة. يبدو أن هذا قد حدث نتيجةً لارتفاع درجات حرارة الهواء في القطب الجنوبي؛ مما يتسبَّب في اتجاه حجم الجليد البحري نحو الانخفاض الشديد في بعض المناطق. يعتمد الكريل على الجليد البحري

لتوفير المأوى والغذاء خلال أشهر الشتاء، وقد لوحظ أنه في السنوات التي ينخفض فيها حجم الجليد البحري يكون الكريل أقلَّ وفرةً في السنوات اللاحقة. كما يبدو أيضًا أنه عند انخفاض مخزون الكريل تزداد أعداد السالبيات. والسالبيات هي حيوانات جيلاتينية تقوم بعملية البناء الضوئي، ويمكنها العيش في مياهٍ أكثرَ دفئًا وأقلَّ إنتاجية من المياه التي يعيش فيها الكريل.

ينفي الاستغلال الطويلُ الأمد للموارد البحرية في القطب الجنوبي والآثار المتزايدة لتغير المناخ؛ المفهومَ الشائع القائل بأن المحيط الجنوبي يمتلك أحدَ آخِر الأنظمة البحرية البِكر على الكوكب. فقد أخرجَت التأثيرات البشرية بلا شك النظامَ البحري للمحيط الجنوبي عن توازنه الطبيعي على الرغم من صعوبة توثيق التغييرات الواقعة بسبب بُعد المنطقة، وغياب المرجعية التاريخية لما كان «طبيعيًّا» في المحيط الجنوبي، ونظرًا إلى التعقيد الذي تتسم به التفاعلات بين الأنواع.

من الخطوات الأولى المهمة التي اتُّخِذَت في سبيل حماية النظام البحري واستعادته في المحيط الجنوبي؛ تلك التي شهدها عام ٢٠١٧ مع تأسيس محميَّة بحر روس. يحتوي الآن بحر روس، وهو خليج عميق في المحيط الجنوبي، على أكبرِ محمية بحرية في العالم بمساحة ٢٫١ مليون كيلومتر مربع. فلا يُسمح بالصيد في مساحة ١٫١ مليون كيلومتر مربع من هذه المحميَّة. غير أنه من المؤسف أن الاتفاقية الخاصة بمنع الصيد ستنتهي خلال ٣٥ عامًا، ومن ثَم فهو ليس محميةً بحرية دائمة بعدُ. في عام ٢٠١٨، أعاقت روسيا والصين والنرويج محاولةَ أعضاء لجنة حفظ الموارد البحرية الحية في منطقة القطب الجنوبي إنشاءَ محمية بحرية أكبرَ في منطقة بحر ويديل بالمحيط الجنوبي، كما رُفض في عام ٢٠١٩ اقتراحٌ بإنشاء محمية بحرية قبالة الساحل الشرقي للقارة القطبية الجنوبية. من الواضح أنه لا يزال أمامنا طريقٌ طويل قبل أن تحظى مساحةٌ كافية من المحيط الجنوبي بالحماية ضد الاستغلال المستقبلي كما ينبغي السماح باسترداد هذه البيئة البحرية المهمة.

الفصل الخامس

الحياة البحرية في المناطق الاستوائية

تشمل البيئة البحرية الاستوائية تلك الأجزاء من المحيط العالمي التي تكون فيها المياه السطحية دافئةً باستمرارٍ على مدار العام، حيث نادرًا ما تنخفض إلى أقلَّ من ٢٠ درجة مئوية. وتوجد هذه المناطق داخل حزامٍ محيطي يمتدُّ على خط الاستواء تقريبًا من مدار السرطان في نصف الكرة الشمالي إلى مدار الجدي في نصف الكرة الجنوبي (خط عرض ٢٣ درجة شمالًا إلى خط عرض ٢٣ درجة جنوبًا).

الشعاب المرجانية

تُجسد الشعاب المرجانية الصورة النمطية للبيئة البحرية الاستوائية، وتمثل أنظمة طبيعية تحظى بأهمية عالمية لجمالها، وتنوُّعها البيولوجي، وإنتاجيتها، وأهميتها الاقتصادية (انظر شكل ٥-١). فهذه «الغابات المطيرة المحيطية» هي أنظمةٌ شديدة التعقيد تضم تنوعًا مذهلًا من الكائنات البحرية — من ربع إلى ثلث جميع أنواع الكائنات البحرية — إضافةً إلى عددٍ من الأنواع المختلفة للشعاب المرجانية على مستوى العالم، التي يُقدَّر مجموعها بالملايين.

تُوفر الشعاب المرجانية الغذاءَ لمئات الملايين من البشر، حيث تُشكِّل أنواعُ أسماك الشعاب نحوَ ربع إجماليِّ الأسماك التي تصطادها البلدان الأقلُّ نموًّا. كما توفر حواجزَ حماية طبيعية تقي المجتمعات الساحلية من الأمواج المتولدة من الأعاصير. كما تُمثل أساسًا للعمالة في مجال السياحة لملايين الأشخاص في الكثير من المناطق التي تنتشر فيها الشعاب في مياهها الساحلية. وبعيدًا عن هذه الخدمات ذات الصلة بالنظام البيئي، التي تُقدر بمليارات الدولارات، تحظى الشعاب المرجانية بقيمةٍ جوهرية هائلة من المستحيل تحديدها كميًّا؛ كما يمكن أن يشهد بذلك أيُّ شخص قد مارس الغطسَ أو الغوصَ في

بقعةٍ ذات شعابٍ سليمة؛ فلولا هذه الشعاب المرجانية لأصبح كوكبنا ومجتمعنا البشري أكثرَ فقرًا ولا حدود لفقره.



شكل ٥-١: منظرٌ جوي للشعاب المرجانية في جزيرة هيرون، الحاجز المرجاني العظيم، أستراليا.

المتطلبات الفيزيائية للشعاب المرجانية

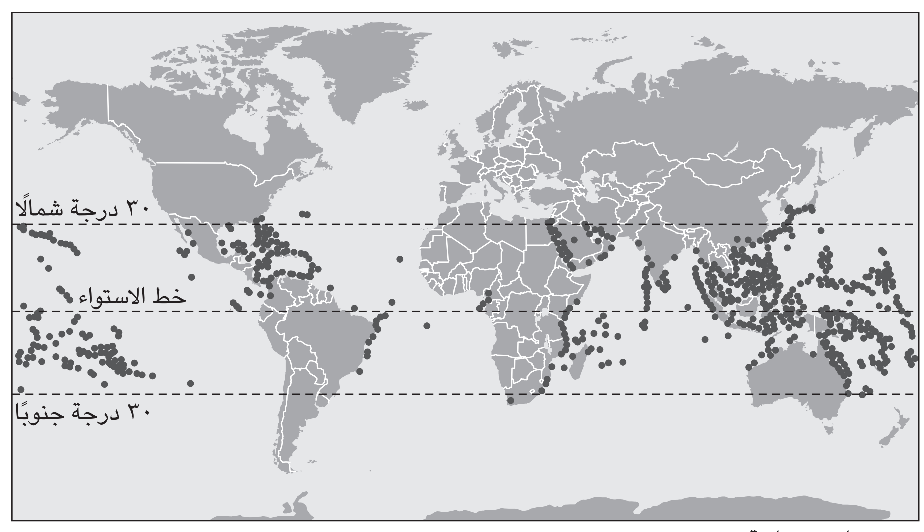
على الرغم من أهميتها، تحتلُّ الشعاب المرجانية مساحةً شديدةَ الصغر من سطح الكوكب — ما يزيد قليلًا على ٢٨٤ ألف كيلومتر مربع — وهي ما تقلُّ عن ١٫٢ في المائة من مساحة الرف القاري للمحيطات. وهذا يجعل الشعاب المرجانية نظامًا بيئيًّا نادرًا على النطاق العالمي. هذا لأن المتطلبات الفيزيائية للحيوانات الأساسية البانية للشعاب — المرجانيات — محدَّدة للغاية.

تزدهر المرجانيات البانية للشعاب بشكلٍ أفضلَ في درجات حرارة المحيط الأعلى تقريبًا من ٢٣ درجة مئوية، ويوجد بعضها حيث تنخفض درجات الحرارة إلى أقلَّ من ١٨ درجة مئوية مُددًا زمنية كبيرة. وبذلك تغيب الشعاب المرجانية في خطوط العرض المدارية حيث يحدث التيار الصاعد لمياه البحر الباردة مثلما في السواحل الغربية لأمريكا الجنوبية وأفريقيا. يتطلب ازدهارُ الشعاب المرجانية أيضًا مستوياتٍ عاليةً من الضوء؛ لذلك يقتصر وجودها بشكل عام في مناطق المياه الصافية التي يقلُّ عمقها عن نحو ٥٠ مترًا.

لا يمكن للمرجانيات البانية للشعاب عادةً أن تتحمل تحليةَ مياه البحر لما يقلُّ عن درجة ملوحة ٣٠ تقريبًا أوقاتًا كبيرة؛ ومن ثَم لا توجد في المناطق المعرَّضة لتدفقاتٍ متقطعة من المياه العذبة، مثل المناطق الواقعة بالقرب من مصبَّات الأنهار أو في المناطق التي تتدفَّق فيها المياه العذبة بكمياتٍ عالية. لذا تغيب الشعاب المرجانية على طولِ كثيرٍ من سواحل المحيط الأطلنطي الاستوائية في أمريكا الجنوبية، التي تعرضَت لتصريف المياه العذبة من نهر الأمازون ونهر أورينوكو.

وأخيرًا، تشهد المرجانيات البانية للشعاب أفضلَ ازدهار لها في المناطق ذات الحركة الموجية المعتدلة إلى العالية، والتي تُبقي على مياه البحر مشبعةً جيدًا بالهواء، مما يجلب إمدادًا مستمرًّا من الطعام للمرجانيات، ويُزيل الرواسب الحاجبة للضوء من على سطحها.

تطورَت أنظمة الشعاب المرجانية المذهلة والمثمرة في تلك الأجزاء من المحيط العالمي؛ حيث يتلاقى هذا المزيج من الظروف الفيزيائية، كما هو الحال في البحر الكاريبي، والعديد من جزر إندونيسيا، والفلبين، وجنوب المحيط الهادي، والمحيط الهندي الاستوائي، وفي البحر الأحمر، وقبالة الساحل الشمالي الشرقي والساحل الشمالي الغربي لأستراليا (انظر شكل ٥-٢).



شكل ٥-٢: توزيع الشعاب المرجانية.

الطبيعة البيولوجية للشعاب المرجانية

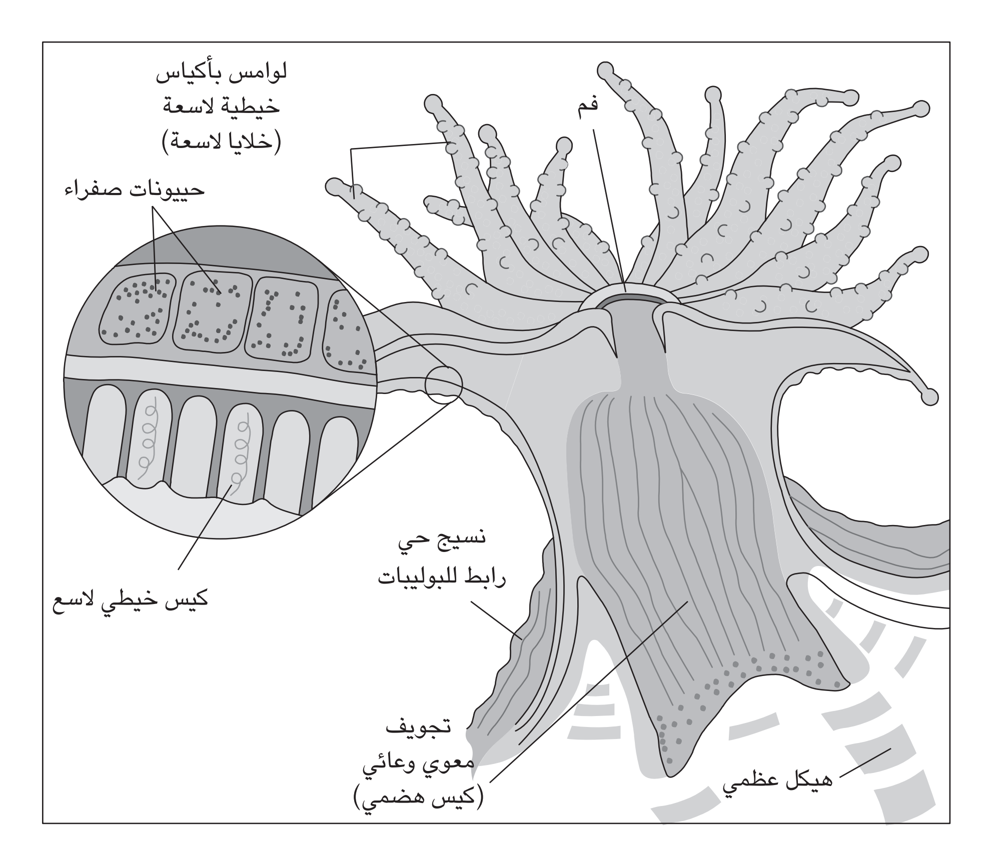
المرجانيات البانية للشعاب، والمعروفة أيضًا باسم المرجانيات الصلبة أو الصخرية، هي حيوانات مُكوِّنة للمستعمرات تنتمي للشُّعبة ذاتِها التي تنتمي لها شقائقُ النعمان البحرية. وتتكون كلُّ مستعمرة من الآلاف من الحيوانات التي تُسمى بالبوليبات (انظر شكل ٥-٣). تنمو المستعمرات بالتكاثر اللاجنسي؛ حيث تتبرعم باستمرارٍ عن البوليبات بوليباتٌ جديدة، مُكوِّنةً طبقةً ممتدة من البوليبات المتطابقة وراثيًّا التي تشترك في تجويفٍ مِعوي واحد.

مع نمو المستعمرة، تستخرج البوليبات الكالسيوم من مياه البحر المحيطة لإفراز هيكل عظمي من كربونات الكالسيوم بكميات كبيرة، والذي يكون خارج البوليبات نفسها. وحسب النوع، توجد البوليبات داخل أكواب منفردة في الهيكل العظمي، أو في صفوف داخل أخاديد طويلة في الهيكل العظمي. وقد تتراجع البوليبات في الهيكل العظمي لتحظى بالحماية.

إحدى السمات المميزة للمرجانيات البانية للشعاب أنها على الرغم من كونها من الحيوانات فإنها يتميَّز سلوكها وظيفيًّا من عدة نواحٍ بأنه شبيهٌ بسلوك النباتات، وهو ما يُفسر عدم ازدهارها إلا في البيئات الجيدةِ الإضاءة. وهذا لأن جميع المرجانيات البانية للشعاب قد دخلَت في علاقةٍ وثيقة بالكائنات الدقيقة التي تقوم بالبناء الضوئي. تتميز الأنسجة المُبطِّنة للوامس البوليبات وتجويفها المعوي بامتلائها بخلايا بناءٍ ضوئي تُعرف بالحييونات الصفراء (انظر شكل ٥-٣). وهي عبارة عن سوطيَّات دوَّارة معدَّلة تقوم بالبناء الضوئي، في مجموعة من العوالق النباتية التي تعيش عادةً مستقلةً في المحيطات (انظر الفصل الثاني). يمكن لسنتيمترٍ مربع واحد من الأنسجة المرجانية أن يحتويَ على عدة ملايين من خلايا الحييونات الصفراء.

«تُنمِّي» المرجانيات البانية للشعاب الحييونات الصفراء كي تحصل منها على غذائها. غير أنها لا تستهلك الحييونات الصفراء مباشرةً، بل تتحكم كيميائيًّا في كثافتها في أنسجتها وتحفزها كي تُفرزَ بعض المركَّبات العضوية، التي تُخلِّقها عبر البناء الضوئي، مباشرةً في أنسجة أمعائها. وبحسب النوع، تستخلص الشعاب المرجانية ما بين ٥٠ في المائة إلى ٩٥ في المائة من طعامها تقريبًا من الحييونات الصفراء.

ثَمة طرقٌ عديدة تحصل بها الشعاب المرجانية على الحييونات الصفراء. عندما تتبرعم البوليبات لاجنسيًّا، يحتفظ كل بوليب جديد ببعض الحييونات الصفراء. كما



شكل ٥-٣: تشريح بوليب مرجاني.

يمكن للبوليبات المرجانية أن تتكاثر جنسيًّا حيث يدمج بوليب عادةً بعضًا من حييوناته الصفراء في كل بيضة يُنتِجها. غير أن العديد من الشعاب المرجانية لا تتوارث الحييونات الصفراء، وينبغي أن تحصل عليها من البيئة المحيطة أثناء نموها. في هذه الحالة، يبدو أن اليرقات المرجانية تُفرز مادةً كيميائية في مياه البحر تجذب السلالات المفضَّلة من السوطيات الدوارة، التي تُبتلع وتُدمج في خلايا المرجان نفسه. يحيط المرجان بعد ذلك كلَّ خلية من خلايا السوطيات الدوارة بغشاءٍ خاص، ويبدأ في التحكم في عملية تمثيلها الغذائي.

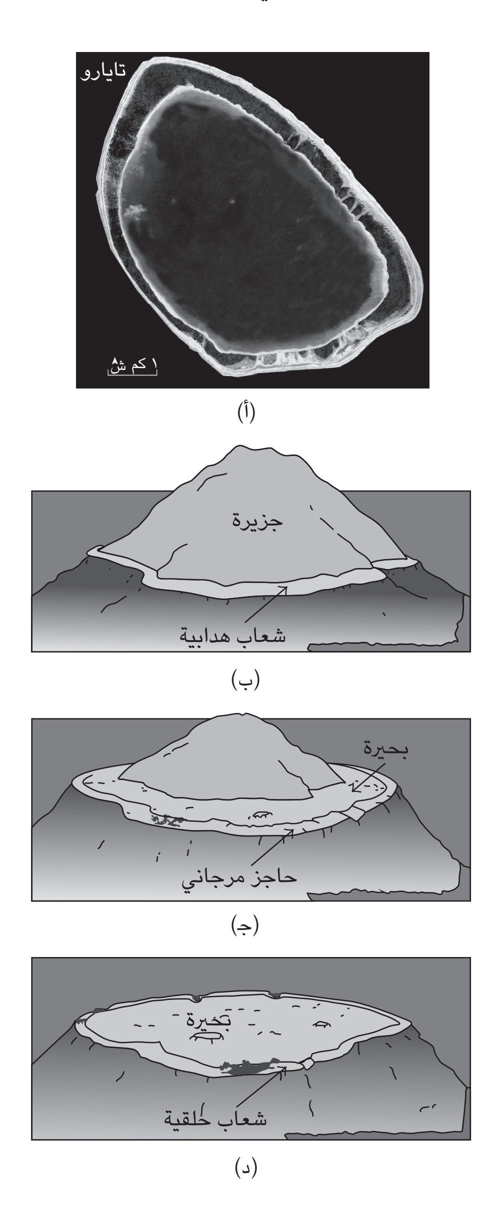
يستفيد كلٌّ من الشعاب المرجانية والحييونات الصفراء من علاقتهما التكافلية، غير أن الشعاب هي الطرف المسيطر في العلاقة. يكمن جمالُ تلك العلاقة في الطريقة التي تُمكِّن بها كلَّ مُغذٍّ من المغذيات العاليةِ الكفاءة من إعادة التدوير بين الطرفَين. تحصل الحييونات الصفراء التي تقوم بالبناء الضوئي، والتي تجد لها ملجأً حاميًا داخل أنسجة المرجان، على إمداداتٍ مستمرة من منتجات نُفايات التمثيل الغذائي اللازمة لعملية البناء الضوئي — ثاني أكسيد الكربون، والنيتروجين، والفوسفور — مباشرةً من مُضيفها المرجاني. في وجود الضوء، تُحوِّل هذه العناصر الغذائية إلى مركَّبات عضوية، «يسرق» المرجانُ بعضَها طعامًا. كما يستفيد المرجان أيضًا من الأكسجين الذي تُولِّده الحييونات الصفراء منتجًا ثانويًّا لعملية البناء الضوئي.

على الرغم من توفير الحييونات الصفراء لنسبةٍ كبيرة من احتياجات الشعاب المرجانية من الطاقة؛ فإن معظمَ المرجانيات البانية للشعاب تُكمِّل نظامَها الغذائي بالتقاط الطعام من البيئة الخارجية. عادةً ما تتغذى الشعاب المرجانية في الليل عن طريق مدِّ بوليباتها أعلى الهيكل العظمي، وهو ما يجعل المستعمرات المرجانية تبدو «مغطاةً بالفراء» في الليل. يحيط بفمِ كل بوليب حلقةٌ من اللوامس مزوَّدة بخلايا «لاسعة» خاصة، تُسمى بالأكياس الخيطية اللاسعة، (انظر شكل ٥-٣)، تُخرج خيوطًا سامَّة ولزجة تُخمِد الحيوانات الصغيرة، وخاصة العوالق الحيوانية، التي تتغذَّى عليها من المستعمرات المرجانية. كما تفرز الشعاب المرجانية خيوطًا لزجةً من المخاط تجمع الجسيمات العضوية الصغيرة، والتي تُسحَب بعد ذلك إلى أفواه البوليبات.

أنواع الشعاب المرجانية

تنمو الشعاب المرجانية ببطء، في حدود بضعة سنتيمترات في السنة، غير أنها تُشكِّل على مدى حِقبٍ زمنية طويلة هياكلَ متينةً وضخمة، وهي الهياكل الكبرى ضمن الهياكل التي تصنعها الكائنات الحية. وهناك ثلاثة أنواع رئيسية لهياكل الشعاب المرجانية؛ الشعاب الحلقية، والشعاب الهدابية، والحواجز المرجانية (انظر شكل ٥-٤).

يَشيع وجود الشعاب الحلقية في المناطق الاستوائية للمحيط الهندي والمحيط الهادي، ويرتبط وجودها بالجزر المحيطية (انظر شكل ٥-٤(أ)). يبدأ تكوُّن الشعاب الحلقية عند استعمار المرجانيات البانية للشعاب جوانبَ جزيرةٍ بركانية حديثة التشكُّل لتُكوِّن شعابًا «هدابية» (انظر شكل ٥-٤(ب)). غالبًا ما تغرق مثلُ هذه الجزر المُشكَّلة حديثًا ببطءٍ؛



شكل ٥-٤: مراحل في تكوين الشعاب الحلقية. الصورة عبارة عن منظر جوي لتايارو، وهي جزيرة مرجانية حلقية صغيرة في غرب مجموعة جزر تواموتو في بولينزيا الفرنسية.

نظرًا إلى الوزن الهائل الذي تبذله على قاع المحيط الأساسي. أثناء غرقها، تستمر الشعاب المرجانية المحيطة بها في النمو لأعلى على طبقةٍ من كربونات الكالسيوم التي تُفرزها، مكوِّنةً رصيفًا من الحجر الجيري الذي يزداد عمقًا بمرور الوقت. تنفصل هذه الشعاب في النهاية عن الجزيرة ببحيرةٍ تملؤها مياهُ البحر، وتُعرف باسم «الحواجز» المرجانية (انظر الشكل ٥-٤(ج)). وعندما تختفي الجزيرة نفسُها في النهاية تحت سطح المحيط، تستمر الشعاب المرجانية في النمو صعودًا من قاعدتها الجزرية نحو سطح المحيط، مكوِّنةً هيكلًا دائريًّا أو شبهَ دائري حول البحيرة، وهو ما يُعرف بالشعاب الحلقية (انظر شكل ٥-٤(د)).

يمكن للذروة الحية للشعاب الحلقية أن ترتكزَ على طبقةٍ سميكة للغاية من الحجر الجيري الذي كوَّنَته الشعاب المرجانية. اخترقت ثقوبُ السبر في حلقية إنيويتك بجزر مارشال ما يقرُب من ١٤٠٠ متر في الحجر الجيري قبل الاصطدام بالصخر البركاني، مُشكِّلةً الجزءَ العُلوي من الجزيرة البركانية التي نشأت عليها الشعاب الحلقية. كان من الممكن أن يستغرق الأمر نحو ٦٠ مليون سنةٍ من نمو الشعاب المرجانية لإنشاء غطاءٍ بهذا السُّمك من الحجر الجيري.

يمكن أن تنموَ أيضًا الشعاب الهدابية والحواجز المرجانية بمحاذاةِ كُتل اليابسة القارِّية. تفصل الشعابَ الهدابية عن الساحل قناةٌ ضيقة، بينما توجد الحواجز المرجانية على مسافةٍ أكبر قبالة الساحل. تنتشر مثل هذه الحواجز المرجانية عندما ينحسر الخط الساحلي الذي تنمو عليه أو يغمره ارتفاعُ منسوب مياه البحر. من شأن الحواجز المرجانية أن توجد بهياكل كبيرة للغاية، وأكبرها هو الحاجز المرجاني العظيم الذي يمتدُّ إلى نحو ٢٦٠٠ كيلومتر قبالة الساحل الشمالي الشرقي لأستراليا.

إنتاجية الشعاب المرجانية

يُمثل المرجانُ العمودَ الفقري للنظام البيئي للشعاب، حيث يُشكِّل موئلًا معقدًا ثلاثيَّ الأبعاد يدعم جيدًا التنوُّعَ والوفرة الملحوظَين في الحياة البحرية. وتتميز اللافقاريات البحرية بغزارة إنتاجها. فبعضها، مثل الإسفنج ومراوح البحر والمرجانيات اللينة، يعيش ملاصقًا للشعاب. بينما يتميز بعضُها الآخر بقدرةٍ أكبرَ على الحركة، مثل قنافذ البحر، وخيار البحر، ونجوم البحر، وسرطان البحر، والجمبري، وبزاقات البحر. كما توجد الأسماك الملوَّنة بوفرةٍ وبصورة لافتة، وينتشر عيش الأسماك المفترسة الكبيرة مثل الهامور، والباراكودا وأسماك القرش على الشعاب السليمة.

تُشكِّل الشعاب المرجانية السليمة أنظمةً بحرية غزيرة الإنتاج. وهذا في تباينٍ صارخ مع مياه المناطق الاستوائية المحيطة بالشعاب، التي تُعرف بفقرها في المغذيات والإنتاج. فمن شأن الشعاب المرجانية أن تتَّسم بإنتاجية ٥٠ ضعفًا أو حتى ١٠٠ ضعفٍ من إنتاجية بيئة المحيطات المحيطة؛ ولذلك عادةً ما تُعد بمنزلة واحاتٍ وسط الصحاري البحرية الاستوائية.

من الصعب في البداية أن نفهم كيف من شأن الشعاب المرجانية أن تتمتع بالإنتاج الغزير نظرًا إلى عدم وجود كائنات منتجة أولية تعيش على الشعاب المرجانية. إلا أن الحييونات الصفراء المخبَّأة داخل أنسجة المرجانيات نفسها تَشغل ما يصل إلى ١٠ في المائة من الكتلة الحيوية للمرجانيات الحية؛ وبذلك تُمثل كتلةً كبيرة من الكائنات المنتجة الأولية الدقيقة. ينتشر أيضًا على نطاقٍ واسع عيشُ أنواعٍ أخرى من الكائنات المنتجة الأولية على الشعاب المرجانية، بما في ذلك الطحالب المجهرية، والبكتيريا الخضراء المزرقة التي تخترق الهياكل العظمية المرجانية، والطحالب المرجانية الحمراء والخضراء التي تُشكِّل طبقةَ تغطيةٍ واسعة الانتشار على الأسطح الصلبة المكشوفة، وأشكالٌ مختلفة من الطحالب الجيرية الدقيقة التي تُشكِّل طبقاتٍ تشبه العشب على أجزاءٍ من الشعاب. كل هذا يَزيد من الكتلة الكبيرة، على الرغم من عدم وضوحها للعيان بعض الشيء، من الكائنات الحية التي تقوم بالبناء الضوئي وتعيش على الشعاب المرجانية.

تتميَّز مياه البحر المتدفقة فوق الشعاب المرجانية بأنها مُضاءة جيدًا، غير أنها شديدةُ الفقر في المغذيات. إذن من أين تأتي المغذيات لتدعم هذه الواحات البحرية الاستوائية الغزيرة في إنتاجيتها؟ كما اتضح، فإن الشعاب المرجانية هي بمنزلة أحواض هائلة من المغذيات؛ إذ تمتلك القدرةَ على البحث عن النيتروجين والفوسفور المتاحين في محيطاتها الفقيرة بالمغذيات، ثم تحتفظ بهذه المواد الغذائية وتستخدمها بكفاءةٍ عالية. تمتصُّ الطحالب المرجانية بعضًا من المغذيات الشحيحة مباشرةً من مياه البحر المتدفقة فوق الشعاب المرجانية. علاوةً على ذلك، تحصل الشعاب المرجانية على بعض المغذيات من العوالق الحيوانية والجزيئات العضوية الميتة التي تُرشِّحها من مياه البحر مصدرًا غذائيًّا تكميليًّا. كما تتكون أيضًا النتراتُ عن طريق البكتيريا الخضراء المزرقة المُثبِّتة للنيتروجين التي تعيش في صلةٍ بالشعاب المرجانية وكائنات الشعاب الأخرى، مثل الإسفنج، أو التي تتميز بالعيشِ المستقلِّ في مياه البحر. وبمجرد الحصول على هذه المغذيات الثمينة، يُعاد تدويرها جيدًا مرارًا وتَكرارًا بين الكائنات المنتجة الأولية والحيوانات التي تعيش على

الشعاب، وذلك مع عدم افتقاد البيئة المحيطة منها سوى القدْر الضئيل. أفضل مثال على ذلك هو إعادة التدوير المُحكمة للمغذيات بين الحييونات الصفراء وأنسجة مُضيفاتها المرجانية.

توجد الطحالب الكبيرة اللحمية المكشوفة، أو الأعشاب البحرية، متناثرةً على الشعاب المرجانية السليمة؛ لأن الأسماك العاشبة تستهلكها في الحال، ومن أمثلة تلك الأسماك سمك الدامسل وسمك الجراح التي تتوفر عادةً بأعدادٍ كبيرة على الشعاب المرجانية. كما أن قنافذ البحر، مثل قنافذ البحر السوداء ذات الأشواك الطويلة الخطِرة المظهر، «الدياديما»، هي أيضًا من آكلات العشب بامتياز. تلعب هذه الكائنات العاشبة معًا دورًا مهمًّا في الحفاظ على نظامٍ للشعاب المرجانية السليمة؛ بفضل منعها لنموِّ الطحالب الكبيرة السريعة النمو الأخرى من نموها السريع، ومن قتلها للشعاب المرجانية بحجبها للضوء.

لا تتمتَّع الشعاب المرجانية بتحصينٍ كامل ضد الافتراس برغم هياكلها العظمية الخارجية الواقية. تتكيَّف جيدًا عدةُ أنواع من الأسماك، المعروفة باسم آكلات المرجان، مع التغذية على الشعاب المرجانية. وبعضها مثل سمكة الفراشة، يقطف بوليبات مرجانيةً بأكملها من المستعمرة. فالأفواه الشبيهة بالملقط لسمك الفراشة، المزودة بالعديد من الأسنان الصغيرة، مناسبةٌ تمامًا لهذا الغرض. بينما بعضها الآخر، مثل سمكة الببغاء، يعضُّ أو يَبرُد قِطعًا من المرجان، وكذلك الهيكل العظمي، ويلتهمها، ويهضم الأنسجة الرخوة للشعاب المرجانية وكذلك الطحالب والبكتيريا في الهيكل العظمي المرجاني. وعن الأفواه الشبيهة بالمنقار لأسماك الببغاء، التي تتكون من ١٥ صفًّا من الأسنان الشديدة الصلابة، فتتكيف جيدًا مع هذا النوع من سلوكيات التغذية. فعند الغطس أو الغوص فوق الشعاب، يمكن للمرء أن يسمع الضوضاء الصاخبة لسربٍ من أسماك الببغاء وهي تتغذى على الشعاب المرجانية وتطحنها. أما عن بقايا المواد التي تهضمها سمكة الببغاء، فتُطرح في صورة رمال. تُنتج سمكة الببغاء الكبيرة نحو ٤٥٠ كيلوجرامًا من الرمال في السنة، يتراكم في جيوبٍ فوق الشعاب المرجانية، ويساعد في تكوين الشواطئ الرملية المرتبطة ببعض أنظمة الشعاب المرجانية.

التكاثر الجنسي في الشعاب المرجانية

يمكن للمرجانيات البانية للشعاب الانفصالُ عن المستعمرة الأم، واستعمارُ موائل جديدة عبر التكاثر الجنسي. فمعظم أنواع المرجان خِناث؛ أي لديها القدرة على إنتاج كلٍّ من

البويضات والحيوانات المنوية في المستعمرة الواحدة. وفي بعض الأنواع، تكون القاعدة وجودَ مستعمرات مذكَّرةٍ ومؤنثة منفصلة. فمعظم أنواع الشعاب المرجانية تستخدم ما يُسمى بالسَّرْء عبر البث؛ أي إنها تُطلق أعدادًا ضخمة من الحيوانات المنوية والبويضات في المحيط حيث يحدث الإخصاب. تنمو البويضات المخصَّبة إلى شكل من أشكال اليرقات المهدبة الصغيرة، تُسمى البلانولا، التي تنقلها التياراتُ أيامًا أو أسابيعَ حسب النوع. وعندما تجد البلانولا الظروفَ المواتية، تسبح إلى القاع، حيث تلتصق معًا وتبدأ مستعمرةً جديدة.

في جميع أنحاء العالم، عادةً ما تَسرَأ المستعمرات المرجانية فوق جزء كبير من الشعاب المرجانية بصورةٍ متزامنة في حدثٍ مذهل من السَّرْء الجماعي حيث تُصبح مياه البحر المحيطة مشبَّعةً بالأمشاج المرجانية، التي تشكِّل بقعًا مميزة على سطح المحيط. وفي أجزاء من الحاجز المرجاني العظيم، على سبيل المثال، فإن ملايين المستعمرات التي تتكون من عدة أنواع مختلفة من المرجان تَسرَأ معًا في ليلة واحدة، أو على مدار بضع ليالٍ، وذلك خلال ربيع نصف الكرة الجنوبي أو أوائلِ الصيف بعد اكتمال القمر. على الأغلب، تطوَّر السَّرْء الجماعي في الشعاب المرجانية لتكوين تركيزات كثيفة للغاية من الحيوانات المنوية والبويضات في مياه البحر؛ من أجل ضمان معدَّلاتٍ عالية من الإخصاب الناجح. ويمكن للبويضات المرجانية التمييزُ بين الأنواع المختلفة من الحيوانات المنوية الموجودة في مياه البحر أثناء عملية السرء الجماعي؛ ومن ثَم ترفض الحيوانات المنوية الآتية من نوعٍ مختلف، ومن ثَم تحدُّ من فرص التهجين بين الأنواع.

تتحكم في موسم تكاثر المستعمرات المرجانية عواملُ مثل التغيرات الموسمية في درجة حرارة المحيط أو طول النهار، وهذه العوامل تعمل على وضع الشعاب المرجانية في حالةِ تكاثر في الآن نفسه. كما تُحفِّز السَّرءَ الفعلي للمستعمرات الناضجة عواملُ مختلفة، بما في ذلك دورة القمر، وانخفاض في مستويات الضوء عند غروب الشمس، والإشارات الكيميائية التي تُطلقها في الماء مستعمراتٌ أخرى من النوعِ نفسِه. وهكذا يمكن لما يُسمى بالشعاب المرجانية «البدائية» الكشفُ عن مستويات الضوء، وتمييزُ أطوار القمر، والتواصل فيما بينها كيميائيًّا.

الاضطرابات الفيزيائية والبيولوجية التي تتعرَّض لها الشعاب المرجانية

على الرغم من ضخامة هياكلها، فإن الشعاب المرجانية عُرضةٌ لاضطراباتٍ فيزيائية واسعة النطاق. فالأمواج الكبيرة التي تُحدثها الأعاصير التي تمر بالقرب من الشعاب المرجانية

تعمل باستمرارٍ على تكسُّر مناطقَ شاسعةٍ من الشعاب المرجانية الحية وسقوطها. وعادةً ما يستغرق التعافي من مثلِ هذا الضرر عقودًا تقريبًا أو أكثر. فاحترار المحيط الناجم عن تغير المناخ يُهيئ الظروف لمزيدٍ من العواصف القوية والمتكررة، التي تُسبب ضررًا أكبرَ وأكثرَ تواترًا واتساعًا في نطاقه للشعاب المرجانية، ويحدُّ من قدرتها على التعافي التام في الأوقات التي تتخلَّل هبوب العواصف. كما تُسبب أمواج التسونامي الكبيرة التي تولِّدها الزلازل العنيفة، مثل زلزال ٢٦ ديسمبر ٢٠٠٤، أضرارًا واسعة النطاق. علاوةً على ذلك، يغمر الشعابَ المرجانية الساحلية بشكلٍ دوري جريانُ المياه العذبة الذي يتبع الفيضانات الكبرى، الأمر الذي من شأنه أن يتسبَّب في قتل أعداد كبيرة من الشعاب المرجانية.

تتعرَّض الشعاب المرجانية أيضًا لاضطراباتٍ بيولوجية واسعة النطاق. فالانفجار في أعداد نجم البحر «المكلَّل بالشَّوك» من جنس تيجان الشوك «أكانثاستر» دائمًا ما يؤدي إلى تدمير الشعاب المرجانية في المحيط الهادي، والمحيط الهندي، والبحر الأحمر. يُعد نجم البحر المكلَّل بالشَّوك من نجوم البحر الضخمة؛ إذ يصل قُطره إلى نصف متر، وهو يتغذى تحديدًا على البوليبات المرجانية. ويوجد عادةً بأعدادٍ قليلة للغاية على الشعاب المرجانية، أقلُّ من حيوان واحد لكل هكتار. يمكن لكل نجم بحر منفرد انتزاعُ أنسجة المرجان الحي في مساحة متر مربع أو نحو ذلك كلَّ شهر؛ مما لا يُعد عمومًا معدَّلًا كفيلًا بإلحاق الضرر بالشعاب المرجانية. ولكن عندما تتجاوز أعداده نحو ٣٠ نجم بحر في الهكتار الواحد من الشعاب المرجانية، يبدأ في استهلاك الشعاب المرجانية بمعدَّلٍ أسرع من قدرتها على النمو، ومن شأن ذلك أن تترتَّب عليه نتائجُ كارثية على الشعاب المرجانية. أثناء ذروة نمو أعداد نجم البحر المكلَّل بالشَّوك، التي يمكن أن تستمر عدة سنوات، مع تنقُّل نجوم البحر من شعابٍ مرجانية إلى أخرى، ووصول أعدادها إلى ما يزيد على ١٠٠٠ نجم في الهكتار الواحد، تتعرَّض مساحاتٌ كبيرة من الشعاب المرجانية للتجرُّد، مُخلِّفةً وراءها هياكلَ عظمية عارية (انظر شكل ٥-٥). يُعد التعافي بعد مثلِ هذا التفشي عمليةً بطيئة تستغرق في أي مكان مدةً تتراوح من خمس سنوات إلى أكثرَ من ١٠٠ سنة حسب حجم المساحة المتضرِّرة من الشعاب المرجانية وشدة هذا الضرر، ويمكن أن يلحق الشعابَ المرجانية ضررُ نجم البحر المكلَّل بالشَّوك مجددًا قبل أن تتمكَّن من التعافي التام.

كان أول توثيق لنوبات تفشِّي نمو نجم البحر المكلَّل بالشَّوك في ستينيَّات القرن العشرين في اليابان وأستراليا، وقد لوحِظَت بانتظام منذ ذلك الحين في العديد من الأماكن المختلفة. ربما حدَث مثلُ هذا التفشي بشكلٍ طبيعي في الماضي، إلا أن تواتره وحجمه



شكل ٥-٥: نجم بحر مكلَّل بالشَّوك يتغذَّى على مستعمرات مرجانية. وقد جرَّد نجم البحر الشعاب المرجانية عن يمين الصورة من البوليبات، مُخلِّفًا وراءه هيكلًا عظميًّا عاريًا.

يشهدان تزايدًا الآن، مما يشير إلى وجود تأثير بشري في الأمر. فشبكة الأشواك لدى نجم البحر المكلَّل بالشَّوك تجعل منه وجبةً غيرَ مستساغة لمعظم المفترسات المحتملة، على الرغم من أن بعض أنواع الأسماك يمكنها تناولُه، وكذلك الحلزون البحري الكبير، والمعروف بالترايتون العملاق. وقد افتُرض أن الإفراط في صيد بعض مفترساته من الأسماك، وكذلك المجموعات النَّهِمة من حلزون الترايتون العملاق، ذات القواقع التي يوليها صيَّادو الهدايا التذكارية أثمانًا باهظة؛ قد سمح لأعداد نجم البحر المكلَّل بالشَّوك بالانفجار في بعض المناطق. ومن المقترح أيضًا أن مثل هذه الانفجارات في أعداد نجم البحر المكلَّل بالشَّوك

مرتبطةٌ بجريان المياه من اليابسة بعد هطولٍ غير طبيعي لأمطارٍ غزيرة، مما يؤدي إلى جرف المغذيات الزائدة من الأرض الزراعية إلى المياه الساحلية. تحفز المغذياتُ إزهارَ العوالق النباتية التي تُشكِّل مصدرًا وفيرًا للغذاء لنجم البحر المكلَّل بالشَّوك في مرحلةِ يرقاته العوالقية. هذا من شأنه أن يؤديَ إلى معدَّلاتٍ مرتفعة ارتفاعًا استثنائيًّا من بقاء مراحله المبكرة على قيد الحياة، الأمر الذي يُسفر عن تدفُّقٍ في استجلابِ أعدادٍ كبيرة من الصغار، وانفجارٍ في كثافة أعداد النوع بعد بضع سنوات.

على الرغم من أن أسباب تفشي أعداد نجم البحر المكلَّل بالشَّوك لم تُفهم فهمًا تامًّا بعد؛ فإنَّ لأثره أضرارًا جسيمة على الشعاب المرجانية في العديد من المناطق. فلطالما شهد الحاجز المرجاني العظيم موجاتٍ لتفشي نجم البحر المكلَّل بالشَّوك؛ أولها في عام ١٩٦٢، ثم في الفترتين بين العامين ١٩٧٩ و١٩٩١، والعامين ١٩٩٣ و٢٠٠٥، وكان آخرها ذلك التفشِّي الذي بدأ في عام ٢٠١٠. قلَّت مساحةُ الغطاء المرجاني على الحاجز المرجاني العظيم بنحو ٥٠ في المائة منذ عام ١٩٨٥، ويُعزى ما يقرُب من نصف هذا الانخفاض إلى تفشي أعداد نجم البحر المكلَّل بالشَّوك.

حاولَت الحكومة الأسترالية السيطرةَ على موجات تفشي نجم البحر المكلَّل بالشَّوك في بعض الشعاب المرجانية المختارة باستخدام فِرقٍ من الغوَّاصين الذين يحقنون نجوم البحر بالسُّم، لكن هذا النهج ليس فعالًا بالمرة، ويستلزم الأمر إيجادَ طريقةٍ أفضلَ لاستنقاءِ أعدادٍ كبيرة من نجوم البحر. تنطوي إحدى الطرق الجديدة على اكتشافِ إشارةٍ كيميائية فريدة تُطلقها نجومُ البحر المكلَّلة بالشَّوك في مياه البحر، التي تستحثُّها على التجمع معًا قبل أن يوفر لها السِّرءُ بعض الأمل في التكاثر. وثمة احتماليةٌ لتطوُّر هذه المادة الكيميائية لتصبح «طُعمًا» لجذب أعدادٍ كبيرة من نجوم البحر إلى بقعةٍ واحدة وتسهيل عملية استنقائها.

تتأثَّر الشعاب المرجانية كذلك بمجموعةٍ من الأمراض التي يمكنها أن تتسبَّب في تغيُّر لون أنسجتها المرجانية، وإصابتها بالأورام، وموت أنسجتها. لا يُعرف الكثير عن مسبِّبات هذه الأمراض وآثارها، إلا أنها ترتبط على الأرجح بالعدوى بفيروسات، وبكتيريا، وفطريات مختلفة. وقد تسبَّب مرضٌ مرجاني غايةٌ في الخطوة يُعرف باسم «مرض الشريط الأبيض» في مقتل نوعين من الشعاب المرجانية المتفرعة في منطقة البحر الكاريبي — مرجان قرون الأيَّل ومرجان قرون الألكة — منذ أن لوحظ تفشِّيه في عام ١٩٧٩. شكَّلت هذه الشعابُ المرجانية في الماضي أجماتٍ شاسعةً ومنيعة وبديعة في المياه الضحلة

في جميع أنحاء منطقة البحر الكاريبي، ولكن على مدار الخمسة والثلاثين عامًا الماضية قتَل مرضُ الشريط الأبيض ما يصل إلى ٩٥ في المائة منها، وكلا النوعين مُدرَج الآن في قانون الأنواع المهدَّدة بالانقراض في الولايات المتحدة. ومن المثير للاهتمام أن الأبحاث الحديثة قد كشفَت أن نسبةً صغيرة من مرجان قرون الأُيَّل المتبقِّي مقاوِمةٌ الآن للمرض، مما يفتح المجال أمام الاستزراع الخارجي لهذه السلالات المقاومة للأمراض لإعادة تأسيس جماعاتها في أنحاءٍ مختارة من منطقة البحر الكاريبي.

التأثيرات البشرية المحلية والإقليمية على الشعاب المرجانية

على الرغم من تعرُّض المرجانيات البانية للشعاب لمجموعةٍ من الاضطرابات الفيزيائية والبيولوجية الطبيعية؛ فقد صمَدَت عدةَ ملايين من السنين. أما الآن، فمن المؤسف أن أصبحَت الشعاب المرجانية في خطرٍ مُهدِّد بسبب مجموعة واسعة من الاضطرابات التي يتسبب فيها الإنسانُ على المستويين المحلي والإقليمي.

يُشكِّل الصيد الجائر تهديدًا كبيرًا للشعاب المرجانية. فنحوُ ثُمن سكان العالم — ما يقرُب من ٨٧٥ مليون شخص — يعيشون على بُعدِ ١٠٠ كيلومتر من أماكنِ وجود الشعاب المرجانية. معظم هؤلاء الأشخاص يعيشون في دولٍ أقلَّ نموًّا ودولٍ جُزرية، ويعتمدون بشكلٍ كبير على الأسماك، التي يحصلون عليها من الشعاب المرجانية المحلية، مصدرًا للغذاء. ليس من المدهش إذن أنْ أصبح الصيدُ غيرُ المستدام مشكلةً متفشيةً في معظم أنظمة الشعاب المرجانية في أنحاء الكوكب.

كانت الأسماك المفترسة الأكبر حجمًا وذات القيمة العالية، مثل الهامور والنهَّاش، والتريفالي، وسمك نابليون؛ أولَ الأسماك التي استهدفها الصيادون على الشعاب المرجانية السليمة. يؤدي هذا إلى سرعة استنزافها؛ ومن ثَم يبدأ الصيادون بالضرورة في التحول في صيدهم إلى الأسماك في المستويات الأدنى في السلسلة الغذائية، ويستهدفون في الأساس الأسماكَ العاشبة. ينتج عن ذلك شعابٌ مرجانية تعيش فيها أسماكٌ صغيرة يصعب صيدها، وقليلة في قيمتها الغذائية، وتخلو فعليًّا من الأنواع المفترِسة الكبيرة مثل أسماك القرش والهامور التي تميزَت بالوفرة فيما مضى، كما تخلو من الأسماك العاشبة الأكبر حجمًا التي تتغذى على الطحالب الكبيرة.

تصبح الشعاب المرجانية في هذه الحالة أقلَّ مرونةً وأكثرَ عرضةً للاضطرابات الأخرى في النظام. تُمثِّل الشعاب المرجانية في منطقة البحر الكاريبي مثالًا كلاسيكيًّا على آثار

الصيد الجائر التي تُزعزع استقرار الشعاب. معظم دول جزر الكاريبي مكتظةٌ بالسكان، وقد تعرضَت أعدادٌ كبيرة من الشعاب المرجانية للصيد الجائر بحلول القرن التاسع عشر. يتعرض الآن ما لا يقل عن ٦٠ في المائة من الشعاب المرجانية في المنطقة للصيد الجائر بشكلٍ مفرط، ويندُر بشدة وجود الأسماك المفترِسة والعاشبة.

في البداية كانت إزالة الأسماك العاشبة من النظام تُعوضها زيادةٌ في أعداد قنافذ البحر من نوع «دياديما أنتيلاروم» التي لم يكن عليها التنافس في الغذاء مع الأسماك العاشبة على الطحالب الكبيرة. واصلت هذه القنافذ الرعي مرةً أخرى والتحكم في كمية الطحالب الكبيرة على الشعاب المرجانية. ثم بدايةً من العام ١٩٨٣، انتشر أحد الأمراض الذي يُصيب قنافذ البحر بسرعةٍ عبر منطقة البحر الكاريبي، وقتل تقريبًا جميعَ قنافذ «دياديما» في جميع أنحاء المنطقة في غضون عامين. في ذلك الحين وقد غابت في الواقع جميعُ الكائنات العاشبة التي تعيش على الشعاب المرجانية؛ ازدهرَت الطحالب الكبيرة بسرعة، وفاقت الشعاب المرجانية في النمو. نتيجةً لذلك، وعلى مدار عقدٍ من الزمان، تحوَّلت الشعاب المرجانية في جميع أنحاء منطقة البحر الكاريبي من هياكل يُهيمن عليها المرجانُ إلى أنظمةٍ تهيمن عليها الأعشاب البحرية التي تفتقر إلى سمات اللون، والتنوُّع، والتعقيد التي تتميز بها الشعاب المرجانية السليمة. فبمجرد أن رسخَت الطحالب الكبيرة والسميكة على الشعاب المرجانية، تعرقلَت بشدةٍ إعادةُ نمو الشعاب المرجانية. وهكذا، فمن المؤسف أن هذا الانهيار الهائل الذي يشهده النظام البيئي للشعاب المرجانية في منطقة البحر الكاريبي؛ سيستمرُّ إلى أجلٍ غير مسمًّى مع استمرار الصيد الجائر، وسيزداد تعقيدًا مع وجود عواملِ إجهادٍ أخرى. فالشعاب المرجانية في جميع أنحاء العالم عرضةٌ لضغوط الصيد الجائر، وتنتشر الآن على نطاقٍ واسع تحولاتٌ مماثلة لتلك التي حدثت في منطقة البحر الكاريبي.

الشعاب المرجانية مُعرَّضةٌ بشدة لأي تدهور في جودة المياه ينشأ عن أعمال التنمية الساحلية والتغيرات في استخدام الأراضي. فجريان الرواسب من الأراضي الزراعية، والمناطق التي أزيلت منها الغابات، ومن أعمال الحفر أثناء تطوير السواحل يُقلل من نقاء المياه، ويغطي الشعاب المرجانية بالرواسب، مما يقلل بدوره من كمية الضوء الذي تمتصه إلى الشعاب المرجانية، ويؤدي إلى اختناق البوليبات. يمكن حتى للزيادات الطفيفة في تركيزات المغذيات أن تتسبَّب في إجهاد الشعاب المرجانية بتحفيزها مستوياتٍ مرتفعة من العوالق النباتية، التي تُقلل من نقاوة المياه واختراق الضوء. كما تحفز زيادةُ العناصر الغذائية

نموَّ الطحالب الكبيرة الخانقة للشعاب المرجانية. تُشكِّل إذن نفايات الصرف الصحي غير المُعالَجة تهديدًا واضحًا على الشعاب؛ وكذلك المغذيات في الصرف الزراعي.

يؤثِّر الصرف القادم من الأراضي الزراعية على مرونة أجزاء من الحاجز المرجاني العظيم. فكلٌّ من الرواسب، والمغذيات، ومبيدات الأعشاب تُصرَف في نظام الحاجز المرجاني العظيم من مستجمعات المياه الضخمة التي تبلغ مساحتها نحو ٤٢٤ ألف كيلومتر مربع. ترعى الماشية في كل مكان في كثيرٍ من أنحاء هذه المستجمعات، وينمو قصب السكر على أجزاءٍ أخرى من مستجمعات المياه، ولا سيما تلك المجاورة للممرات المائية في السهول الفيضية الساحلية الخِصبة. ويُقدَّر أن صرف الرواسب الآن قد زاد بمعدَّل من خمس إلى تسع مرات، وأن تأثير المياه الغنية بالمغذيات تصاعد ليتجاوز ١٠ إلى ٢٠ ضِعفَ ما كان عليه التأثير قبل تطوير مستجمعات المياه قبل عام ١٨٥٠.

من الصعب تقييمُ التأثيرات الإجمالية لهذا الصرف على الحاجز المرجاني العظيم بسبب عدم وجود معلومات عما كانت عليه الشعاب المرجانية قبل تطوير مستجمعات المياه. ومع ذلك، ثمة احتمال كبير بتعرُّض الشعاب المرجانية الموجودة على بُعد نحو ١٠ كيلومترات من الساحل الآن للخطر نتيجةَ فرط المغذيات وأن الشعاب الأبعد عن الشاطئ تتأثر بطرقٍ ستؤدي قريبًا إلى التقليل من مرونتها في مواجهة عوامل الإجهاد الأخرى. واستجابةً لذلك، ثَمة جهودٌ في طريقها لتطبيق ممارسات إدارية جديدة للأراضي، من شأنها أن تُقلل من الملوِّثات في مياه الصرف؛ مثل الاستخدام الأكثر كفاءةً للأسمدة، والحدِّ من استخدام مبيدات الأعشاب، وإعادة إنشاء الغطاء النباتي الضِّفِّي على طول حافات الأنهار والجداول؛ للمساعدة في تصفية مياه الصرف من الرواسب والمغذيات.

لم تؤخذ دراسة الشعاب المرجانية على محمل الجِد على مستوى العالم إلا في سبعينيَّات القرن العشرين؛ حيث كانت الشعاب في معظم الحالات بحالةٍ جيدة بعد بدء التأثيرات البشرية. هذا يجعل من الصعب تحديدَ ما يُشكِّل نظامًا «طبيعيًّا» للشعاب المرجانية السليمة، كما كان موجودًا قبل اتساع نطاق الآثار البشرية. حاول علماء أحياء الشعاب المرجانية الحصولَ على صورةٍ أوضحَ لما يبدو عليه نظام الشعاب المرجانية غير المتأثر؛ ومن ثَم يعيدون ضبط «أساسنا» المتحيز، وذلك من خلال دراسة الشعاب المرجانية في الشعاب الحلقية غير المأهولة في جزر لاين النائية، التي تقع في وسط المحيط الهادي على بُعد ١٦٠٠ كيلومتر جنوب هاواي. ثم قارنوا ما وجدوه في الشعاب الحلقية غير المأهولة بالشعاب الحلقية الأخرى التي يزداد تعدادُ سكانها باستمرارٍ في سلسلة الجزر نفسِها التي تعرضَت لمستوياتٍ مختلفة من الإجهاد الناتج عن الصيد والتلوث.

وجدوا أن الشعاب المرجانية في الشعاب الحلقية غير المأهولة تهيمن عليها أعدادٌ كبيرة من المفترِسات العليا التي تضمُّ أسماكًا كبيرة مثل أسماك القرش، وأسماك الجاك، والنهَّاش الأحمر، والهامور، وأن الشعاب المرجانية الحية تُغطي ما يقرُب من ١٠٠ في المائة من مساحة القاع، وأنه لا وجود للطحالب الكبيرة في تلك الشعاب. في هذه الشعاب المرجانية تتكون نسبة ٨٥ في المائة استثنائية من الكتلة الحيوية السمكية من المفترسات الكبيرة، التي يتشكل تقريبًا ثلاثةُ أرباعها من أسماك القرش. يدعم هذه الكتلةَ الحيوية «التي تميزها غلَبةُ المستويات العليا في السلسلة الغذائية» من الأسماك المفترسة؛ معدَّلُ دورانٍ سريع للتكاثر السريع ونموِّ الأسماك المُفترَسة مثل سمك الفراشة، وسمك الببغاء، وسمك الدامسل. أما الشعاب المرجانية في الجزر الحلقية المأهولة بالسكان، فتختلف عن ذلك تمامًا. ففيها تندُر الأسماك المفترسة، وتهيمن على الشعاب المرجانية أعدادٌ كبيرة من الأسماك العاشبة الصغيرة بحجم أسماك أحواض السمك، في ذلك النمط من «غلبة المستويات الدنيا في السلسلة الغذائية» الذي نظنه إحدى خواص الشعاب المرجانية. تتميز هذه الشعاب بمستوياتٍ أقلَّ بكثير من الغطاء المرجاني، وبكمياتٍ أكبرَ بكثير من الطحالب الكبيرة. وهكذا، تُزودنا هذه الأنظمة القليلة المتبقية للشعاب المرجانية في الجزر الحلقية النائية غير المأهولة بلمحةٍ عمَّا بدَت عليه معظم الشعاب المرجانية منذ مئات السنين قبل انتشار التأثير البشري.

التأثيرات البشرية على النطاق العالمي على الشعاب المرجانية

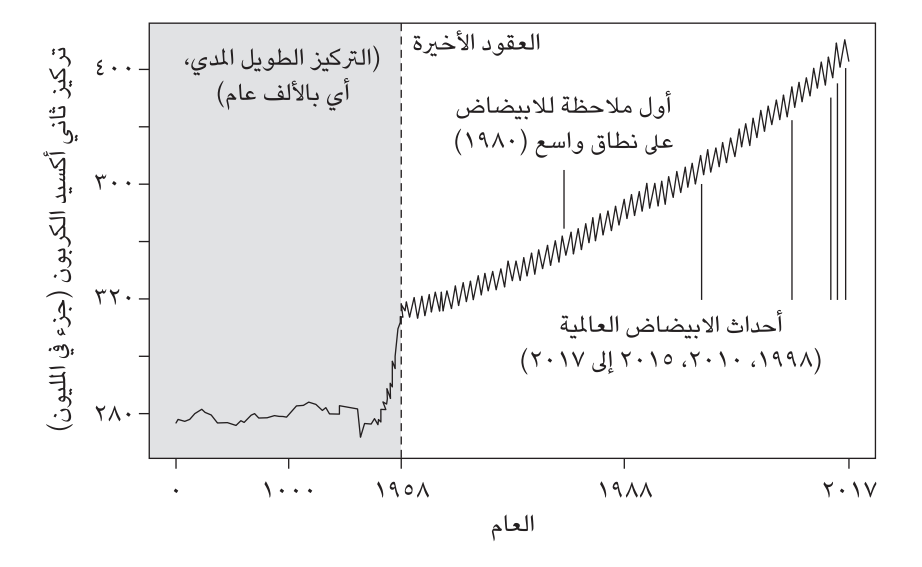
لم يتعدَّ نطاق التهديدات البشرية على الشعاب المرجانية الذي تناولناه حتى الآن المحليةَ أو الإقليمية. غير أن الخطورة القصوى التي تهدِّد الشعاب المرجانية هي خطورةٌ عالمية في نطاقها؛ إذ تتمثل في احترار المحيطات وتحمُّضها؛ نتيجةَ أزمة المناخ التي يتسبَّب فيها الإنسان.

تُعرف الشعاب المرجانية بحساسيتها الشديدة لدرجة حرارة البحار؛ ومن ثَم تتسبَّب أيُّ زيادات طفيفة في درجات الحرارة عن الدرجات القصوى المعتادة في فصل الصيف؛ في إجهادها. وتعاني الشعاب المرجانية التي تجهدها الحرارة من «الابيضاض»، حيث تطرد الحييونات الصفراء من أنسجتها. ومن دون الحييونات الصفراء تصبح الأنسجة المرجانية شفافةً، ويظهر من خلالها الهيكلُ العظمي الجيري الأبيض الموجود تحتها. إذا كان الإجهاد في درجة الحرارة متوسطًا وقصيرَ المدى، يمكن للشعاب المرجانية أن تُعيد

اكتساب حييوناتها الصفراء وأن تحتفظ بحياتها، على الرغم من أنها قد تكون أكثرَ تأثرًا بضغوطٍ أخرى، مثل الأمراض. فالشعاب المرجانية التي أجهدَتها الحرارة بشدةٍ ليست لديها القدرة على استعادة حييوناتها الصفراء بالسرعة الكافية، ولا يمكنها العيش من دونها.

تُعتبر نوباتُ ابيضاض الشعاب المرجانية العرضية القصيرة المدى ظاهرةً طبيعية. ولكن ابتداءً من عام ١٩٨٠، ازدادت وتيرةُ وشدةُ ابيضاض الشعاب المرجانية عالميًّا بشكل سريع؛ نتيجةً لاحترار المحيطات الناتج عن زيادة تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي للكوكب (انظر شكل ٥-٦). فمنذ الابيضاض الذي أصاب الشعابَ المرجانية عالميًّا في عام ١٩٨٠، لم يرجع ليُصيبها مرةً أخرى إلا في عامَي ١٩٩٨ و٢٠١٠ وفي الفترة بين عامَي ٢٠١٥ و٢٠١٧. وتلك المرة الأخيرة — في السنوات «المتعاقبة» الأولى من نوعها، والأطول، والأوسع نطاقًا، والأكثر ضررًا إلى يومنا هذا — قد أصابت جميعَ مناطق الشعاب الرئيسية على الكوكب. وكان تأثيرها على الحاجز المرجاني العظيم كارثيًّا؛ فقد نفق ٤٩ في المائة من جميع الشعاب المرجانية الواقعة على امتداد ١٦٠٠ كيلومتر. في الماضي، كان الوقت يكفي لتمكُّن الشعاب المرجانية من استعادةِ بعضٍ من غطائها قبل الإصابة بالابيضاض مرةً أخرى. إلا أن تصور درجات حرارة سطح المحيطات في المستقبل، إلى جانب المعرفة بفسيولوجيا الشعاب المرجانية؛ يُظهر أنه بحلول عام ٢٠٥٠ تقريبًا سيصيب الابيضاضُ الشعابَ المرجانية على مستوى العالم سنويًّا، وأنه سيصيبها في بعض المناطق بحلول منتصف ثلاثينيَّات القرن الحادي والعشرين. وهكذا فنحن الآن مع الأسف على مشارفِ مرحلةٍ يتفوق فيها معدَّلُ الإصابة بالابيضاض على قدرة الشعاب المرجانية على التعافي.

لا تتسبَّب هذه الزيادة في تركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي في ارتفاع درجة حرارة المحيطات فحسب، ولكنها كما بينَّا في الفصل الأول تجعل مياه البحر أكثرَ حمضية. وتحمُّض المحيطات بدوره يجعل من الصعب على المرجان تصنيعَ هياكله العظمية من كربونات الكالسيوم. من ثَم يستلزم الأمر من الشعاب المرجانية أن تستهلك المزيد من الطاقة كي تُنتج هياكلها العظمية، وهو ما يؤدي إلى إبطاء نموِّها، ويتسبب في الإجهاد، الذي بدوره يجعلها أكثرَ عرضةً لعوامل الإجهاد الأخرى مثل درجة الحرارة والأمراض. سيؤدي استمرار التحمض في النهاية إلى توقف الشعاب المرجانية عن النمو تمامًا، كما سيتسبب، في مرحلةٍ ما، في ذوَبان هياكلها العظمية ببطء. وبمعدَّلات التحمض



شكل ٥-٦: التغيُّرات في تركيز ثاني أكسيد الكربون (CO_2) في الغلاف الجوي للأرض على مدى الألفي عام السابقتين، تزامنًا مع مرات ابيضاض الشعاب المرجانية عالميًّا. يعرض الجزء الرمادي الزيادةَ ذات المعدَّل الطويل المدى في تركيز ثاني أكسيد الكربون بينما يعرض الجزء الأبيض معدَّل زيادة تركيزه في العقود الأخيرة.

الحاليَّة، سيحدث هذا بحلول عام ٢٠٨٠ تقريبًا؛ حيث ستبدأ الهياكل العظمية لمعظم الشعاب المرجانية في الذوبان بمعدَّلٍ أسرع من معدَّل تكوُّنها.

مستقبل الشعاب المرجانية

أمام هذه المجموعة المتنوِّعة من التأثيرات البشرية الإقليمية والعالمية، تتدهور سلامةُ الأنظمة البيئية للشعاب المرجانية تدهورًا سريعًا، وينتظرها مستقبلٌ قاتم للغاية. فستختفي بالكامل الأنظمة البيئية التي يُهيمن عليها المرجان من سطح الكوكب في الخمسين عامًا القادمة إذا لم تُحقَّق أهدافُ الحد من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري لاتفاق باريس ٢٠١٥، المتمثلةُ في الحفاظ على الزيادة في متوسطات درجات الحرارة العالمية بأقلَّ بكثيرٍ من درجتين مئويتين فوق مستوياتِ ما قبل العصر الصناعي. بالمعدَّلات الحاليَّة للانبعاثات

العالمية، سيجتاز العالمُ قريبًا النقطةَ التي يمكن عندها تحقيقُ هذا الهدف. وحتى إن تحقق الهدف، فسيختفي من ٧٠ إلى ٩٠ في المائة من الشعاب المرجانية على الكوكب بحلول عام ٢٠٥٠ تقريبًا. وهكذا وصلنا للأسف إلى النقطة التي سرعان ما ستُصبح بعدها الشعاب المرجانية أنظمةً بيئية أسطورية لا وجود لها سوى في الأفلام وعمليات المحاكاة التي يُنشئها الكمبيوتر لتذكير الأجيال القادمة بما فقَده الكوكب.

من حُسن الحظ أن علماء الأحياء المرجانية وفاعلي الخير والمنظمات غير الحكومية يعملون الآن معًا لتطوير خطط طوارئ طويلة الأمد للحفاظ على بعضٍ على الأقل من النظم البيئية للشعاب المرجانية في حالةٍ طبيعية نسبيًّا، وربما لإعادة تأسيسها في وقتٍ ما في المستقبل. وثمة العديد من الاستراتيجيات التكميلية الآخذة في الظهور، والتي تعطي مجتمِعةً بصيصًا من الأمل حول مستقبل الشعاب المرجانية.

من المبادرات المهمة إنشاءُ حافظة عالمية لنظم الشعاب المرجانية البيئية التي يُرجَّح بشكلٍ كبير بسبب موقعها الجغرافي أن تكون الأقلَّ تأثرًا بتغيُّر المناخ، بما في ذلك احترار المحيطات وتزايد العواصف، التي هي أيضًا الأكثرُ قدرةً على إعادة توطين المناطق المجاورة عبْر انتشار يرقاتها الرحَّالة عندما يستقرُّ المناخ، كما نأمُل أن يحدث ذلك. وقد أُنجز هذا البحث الآن مُسفرًا عن التعرف على ٥٠ منطقةً للشعاب المرجانية فيها فرصة جيدة نسبيًّا للنجاة من أسوأ آثار التغير في المناخ. تشمل هذه المناطق مواقعَ في الفلبين، وبورنيو، وإندونيسيا، والحاجز المرجاني العظيم، وبولينيزيا الفرنسية، وشرق أفريقيا، والبحر الأحمر، ومنطقة البحر الكاريبي. وتتمثَّل الخطوة التالية في تطوير وتنفيذ خطط إدارية ستحمي الشعاب المرجانية في هذه المواقع من التأثيرات المحلية، مثل الصيد الجائر والتلوث؛ وذلك لتعزيز مرونتهم في مواجهة الإجهاد الناتج عن التغيُّر في المناخ.

تهدف إحدى المبادرات الأخرى إلى تحديد «واحات» من الشعاب المرجانية في مختلِف أنحاء الكوكب حيث لا تزال تبدو بقعٌ صغيرة من الشعاب المرجانية قادرةً على البقاء، بل ومزدهرة، ضد أسوأ التأثيرات الناتجة عن تغيُّر المناخ وتأثيرات البيئة المحلية، بما في ذلك الابيضاض، والعواصف، وتفشِّي أعداد نجوم البحر المكلَّلة بالشَّوك. وقد حُدد العديد من هذه الواحات حتى الآن في المحيط الهادي ومنطقة البحر الكاريبي. وفي بعض الحالات، يبدو أن الواحات قد نجَت إلى الآن من أسوأ التأثيرات بسبب مواقعها، على سبيل المثال، بسبب البُعد عن مسارات العواصف الرئيسية، أو بسبب نموِّها في المياه العميقة الأقل تأثرًا بالعواصف، أو بسبب تعرُّضها لمستوياتٍ منخفضة من التلوث. في حالات أخرى، بدا

أن للشعاب المرجانية سماتٍ بيولوجيةً كيَّفَتها لمقاومةٍ أفضلَ لتأثيرات درجات الحرارة في أعالي المحيطات، أو أن أنظمة الواحات تتَّسم بخصائصَ بيئية تُمكِّنها من التعافي سريعًا من الابيضاض أو من ضرر نجوم البحر المكلَّلة بالشَّوك، ومن تلك الخصائص وجودُ أعداد كافية من آكلات العشب في تلك الأنظمة تضمن هذا التعافيَ. تساعد هذه الواحات الصغيرة في تحديد المناطق التي يمكن إعطاء الأولوية للاهتمام بحفظها، وقد تعمل في المستقبل مواقعَ لإعادة إعمار المناطق المجاورة؛ وذلك إما عن طريق الانتشار السلبي لليرقات، أو عن طريق الاستزراع الخارجي الإيجابي للشعاب المرجانية ذات الخصائص المواتية في مواقعَ أخرى.

يعتقد العديد من علماء الشعاب المرجانية والعاملين في إدارتها الآن أن مثل هذه التدابير وحدها لن تكون كافيةً لضمان المحافظة والاستعادة للشعاب المرجانية والخدمات البيئية التي توفِّرها للأجيال القادمة. لذلك يرجِّحون الحاجة الماسة لإحداث تدخلات أكثرَ فعالية تنطوي على أساليبَ وتقنياتٍ جديدة. ويشتمل أحد الأساليب المقترحة على «تدفُّق جيني مُساعَد» تُنقَل فيه الشعاب المُقاوِمة بالفعل لدرجات الحرارة المرتفعة في المحيطات إلى المياه الباردة؛ حيث ستكون لها فرصةٌ أفضل في البقاء مع ارتفاع درجات حرارة المحيطات هناك. قد يشمل هذا، على سبيل المثال، نقلَ الشعاب المرجانية المتكيفة مع الحرارة من شمال الحاجز المرجاني العظيم إلى الشعاب الأكثر برودةً في جنوب الحاجز المرجاني العظيم. طورَت كذلك بعض المجموعات البحثية نهجًا آخرَ يُسمى «التطور المُساعَد». من أمثلة التطور المُساعَد تطوير سلالات من الأنواع المرجانية التي تتكيَّف مع درجات حرارةٍ أعلى باستخدام تقنيات التكثير الانتقائية. يمكن بعد ذلك زراعةُ هذه الشعاب المرجانية المقاومة للحرارة واستزراعها خارجيًّا لاستعادة حالة الشعاب المرجانية. كما اقتُرِح أيضًا استخدام تقنيات التحرير الجيني الحديثة، مثل تقنية «كرسبر-كاس٩» CRISPR-Cas9، لتسريع هندسة التطور المُساعَد لسلالاتٍ متفوقة من الشعاب المرجانية، وهذه التقنيات تُجرَّب بالفعل.

على الرغم من أن اعتماد هذه التقنيات ذات الحلول الجذرية على نطاق واسع قد يساعد في الحفاظ على الشعاب المرجانية واستعادتها في مواقع «ذات قيمة عالية»؛ يبدو أنه من غير المرجَّح إمكانيةُ استخدامها استخدامًا فعالًا من حيث التكلفةُ لإرجاع مناطقَ شاسعة من النظم البيئية للشعاب المرجانية لحالتها القديمة ما قبل الاضطراب. في هذه الحالة، قد يستلزم الأمر تطويرَ موائل اصطناعية «مُصمَّمة» للشعاب من أجل مضاعفة

بعض خدمات النظام البيئي التي توفِّرها الشعاب الطبيعية، مثل الموائل لمصايد الأسماك وحماية السواحل. من الواضح أن بيولوجيا الشعاب المرجانية، بطبيعة الحال، على أعتاب حِقبةٍ جديدة تركِّز على ابتكارِ أساليبَ جديدة لحماية واستعادة الأنظمة البيئية للشعاب المرجانية والحفاظ على الأقل على بعضٍ من جمالها وخدمات نظامها البيئي في مواجهة التغُّير المناخي السريع.

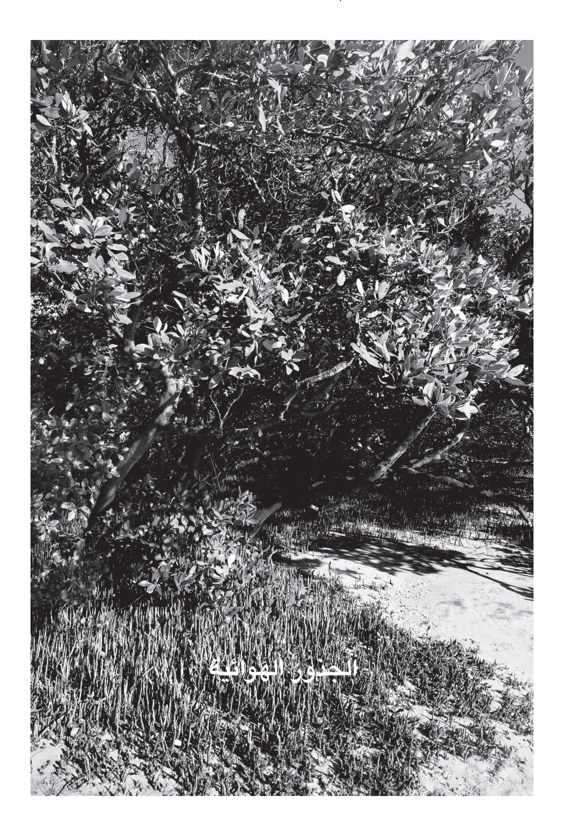
الغابات الساحلية (المانجروف)

الغابة الساحلية هو مصطلحٌ جامع ينطبق على مجموعةٍ متنوعة من الأشجار والشجيرات التي تستعمر مناطقَ المد والجَزر الموحلة المحمية في المناطق الاستوائية وشبه الاستوائية، مما يؤدي إلى تكوُّن غابات المانجروف أو المنجال.

أحد أكثر أنواع أشجار المانجروف شيوعًا المانجروف الأحمر، «ريزوفورا مانجل» والمانجروف الأسود، «أفيسينيا جرمينان». يمكن تمييز المانجروف الأحمر بالتشابك المميز لجذوره الداعمة التي تساعد في تثبيت أشجاره في الرواسب الناعمة. أما المانجروف الأسود فيتميز بجذوعه الأشبه بجذوع الأشجار المعتادة، والمحاطة بكتلةٍ من الهياكل الشبيهة بالأوتاد، تُسمى بالجذور الهوائية (انظر شكل ٥-٧)، يُكوِّنها نظامٌ للجذور المدفونة في الرواسب وتنبثق من الجذع.

تعيش أشجار المانجروف في بيئةٍ قاسية للغاية تتكوَّن من رواسب مشبعة بمياه البحر ومليئةٍ بالمواد المتحللة، مما يجعلها كائنات لا هوائية، أو تفتقر إلى الأكسجين. لتتعامل مع نقص الأكسجين، طورَت أشجار المانجروف نُظمًا للجذور تبرَع في استخلاص الأكسجين من الهواء أو من مياه البحر عند غمرِها به. وتُغطَّى الجذور الداعمة للمانجروف الأحمر بهياكلَ عُقَيديَّة صغيرة تُسمى العُدَيْسات، يتوفَّر من خلالها الأكسجين لنظام الجذور تحت الأرض. أما الجذور الهوائية الشبيهة بالأوتاد في المانجروف الأسود، التي تُغطيها أيضًا العُدَيْسات، فتعمل كأنابيب الغطس؛ إذ تسحب الأكسجين من الهواء أو مياه البحر المحيطة (انظر شكل ٥-٧).

تكيَّفَت أشجار المانجروف أيضًا على النمو في الرواسب المالحة. فهي تتعامل مع الملح الزائد بعدةِ طرق. ومنها أن لجذور شجرة المانجروف وسيقانها أنسجةً خاصة تعمل حاجزًا لتقليل كمية الملح التي تدخل إلى النبات. ولكنَّ بعضًا من الملح لا يخترق النبات، الذي يمكنه تحمُّل تركيزات الملح في عصارته التي يُشكِّل حجمُها أكثرَ من ١٠ إلى ١٠٠



شكل ٥-٧: إحدى أشجار المانجروف الأسود، «أفيسينيا جرمينان» سانت توماس، جزر العذراء الأمريكية، وتُظهر نظامًا يمتدُّ لنطاق واسع من الجذور الهوائية (ج ﻫ).

مرة من حجم عصارة النباتات الأخرى. إضافةً إلى ذلك، فإن أوراق المانجروف الأسود بها غددٌ خاصة تعمل على تركيز الملح الزائد وإفرازه. تتجمع بلورات الملح على السطح السفلي للأوراق وتنجرف عنها عند هطول الأمطار. كما تُركِّز أشجار المانجروف الملح في الأوراق القديمة، واللحاء، والزهور، والثمار التي تأخذ الملح معها عندما تسقط من الأشجار.

تُنتج أشجار المانجروف أزهارًا تُلقحها الرياح أو النحل. تُنتج الزهور البذور التي تنبت في الشتلات التي تنمو لتصبح أشجارًا صغيرة ذات سيقان مميزة على شكل سيجار بينما لا تزال على الأشجار. وتكون هذه الأشجار الصغيرة، أو وحدات التكاثر، جاهزةً

لإنتاج الجذور بمجرد سقوطها من الشجرة الأم ووجودها في موئلٍ مناسب. لوحدات التكاثر هذه القدرةُ على الطفو، ويمكنها العيش في مياه البحر، ويمكن أن تنجرف مع التيارات مدةً تزيد على عام. وبمجرد أن تعلق على الشاطئ المناسب فسرعان ما تمدُّ جذورها وتنمو.

تُشكل أشجارُ المانجروف موئلًا معقدًا ومُنتِجًا. لا يمكن سوى لبعض الكائنات الحية، باستثناء عددٍ قليل من سرطانات البحر، أن تقتاتَ مباشرةً على أوراق المانجروف. غير أن أشجار المانجروف تُسقِط باستمرارٍ أوراقَها وأفرُعَها الميتة، التي تتحلل بفعل البكتيريا والفطريات، مُشكِّلةً الأساسَ لشبكة غذائية مُنتِجة. فسرطان البحر والجمبري وغيرها من الكائنات تتغذَّى على هذه المادة الفتاتية، ثم تتناول الأسماك، والسلاحف، وطيور الشاطئ هذه الكائنات.

تمثِّل أشجار المانجروف أهميةً كبيرة من المنظور البشري. فالمياه التي تحميها غابات المانجروف توفر موئلًا مهمًّا لحضانة صغار العديد من أنواع الأسماك، وسرطانات البحر، والجمبري التي تعيش على الشعاب المرجانية. يعتمد العديد من المصايد التجارية على وجود غابات المانجروف السليمة، بما في ذلك سرطان البحر الأزرق، والجمبري، والكَركند الشائك، وسمك البوري. تعمل غابات المانجروف أيضًا على استقرار الشواطئ الأمامية وحماية الأراضي المجاورة من التآكل، لا سيما من آثار العواصف الكبيرة وأمواج تسونامي. على سبيل المثال، أظهرَت الدراسات أن منطقة الفيضانات في جنوب غرب فلوريدا التي تسبَّب فيها إعصار ويلما في عام ٢٠٠٥ كانت ستمتدُّ داخليًّا بنسبة ٧٠ في المائة من مساحتها لولا الحمايةُ التي وفرَتها لها منطقةٌ من غابات المانجروف الساحلية. تعمل أيضًا غابات المانجروف بمنزلة مرشحات بيولوجية؛ عن طريق إزالة المغذيات الزائدة وحماية الرواسب من المياه المُصرَّفة من اليابسة قبل دخولها إلى البيئة الساحلية، وبذلك تحمي الموائل الأخرى مثل مروج الأعشاب البحرية والشعاب المرجانية.

يلحق الدمار بطبيعة الحال بمساحاتٍ شاسعة من غابات المانجروف بسبب الأعاصير التي تقتلع أشجارها، أو تخنق جذورها بالرواسب الزائدة. عادةً ما يمكن لغابات المانجروف أن تتعافى من مثلِ هذه الأحداث في غضون عَقدَين أو ثلاثة عقود. غير أنه من المؤسف أن معظم التدمير الواقع لأشجار المانجروف يتسبَّب فيه الآن النشاطُ البشري. فالبشر يحصدون أشجار المانجروف بكثافةٍ للحصول على الأخشاب، والحطب، وإنتاج الفحم. كما تُزال بشكلٍ دوري لإفساح المجال لأعمال التنمية الساحلية. علاوة على ذلك،

غالبًا ما تُحوَّل غابات المانجروف إلى أراضٍ زراعية، على سبيل المثال لزراعة الأرز، وإلى بِركٍ كبيرة لاستزراع الجمبري والأسماك وإنتاج الملح.

نتيجةً لهذا الإجهاد الكبير الذي يتسبَّب فيه البشر، تأخذ غابات المانجروف في الاختفاء السريع. في مدةِ ٢٠ عامًا بين عامي ١٩٨٠ و٢٠٠٠ انخفضَت مساحة غابات المانجروف على مستوى العالم من نحو ٢٠ مليون هكتار إلى أقلَّ من ١٥ مليون هكتار، وتَشغل أشجار المانجروف الآن ما يزيد قليلًا عن ثمانية ملايين هكتار. وقد بلغ فقدان أشجار المانجروف في بعض المناطق بعينها معدَّلًا مثيرًا للقلق بحق. على سبيل المثال، فقدَت بورتوريكو نحو ٨٩ في المائة من غابات المانجروف في المدة بين عامَي ١٩٣٠ و١٩٨٥، وفقد الجزء الجنوبي من الهند نحو ٩٦ في المائة من غابات المانجروف بين عامي ١٩١١ و١٩٨٩. يستلزم الأمر جهودًا متضافرةً للحماية والإدارة على المستوى المجتمعي والمستوى الحكومي المحلي والوطني من أجل وقف الدمار الذي يلحق بغابات المانجروف في مواجهة التزايد السريع في تعداد السكان. وتستلزم أشجار المانجروف السليمة القائمة بالفعل حمايةً كاملة قدْر الإمكان. بالإضافة إلى ذلك، ينبغي العمل على تطوير السياسات والاستراتيجيات وتنفيذها للبدء في تجديد موائل المانجروف المتدهورة في المناطق الحرجة من أجل استعادة خدمات نظامها البيئي.

الفصل السادس

بيولوجيا أعماق المحيطات

لا يوجد تعريفٌ واحد لأعماق المحيطات. فقد جرَت العادة على الإشارة إلى عمق ٢٠٠ متر باعتباره الحدَّ الفاصل بين المحيطات «الضحلة» و«العميقة»، غير أن ثمَّة مخططاتٍ أخرى قد استخدمت عمق ٨٠٠، أو ١٠٠٠، أو حتى ٢٠٠٠ متر باعتباره هذا الحدَّ الفاصل. سنستخدم هنا التعريف الحاليَّ للسجلِّ العالمي لأنواع أعماق البحار (WoRDSS) الذي يُعرِّف عمق المحيط بأنه عمود الماء وقاع المحيط الذي يمتد عمقه إلى أكثرَ من ٥٠٠ متر، وهو العمق الذي يكون عنده كلٌّ من الاختلاف الموسمي في درجات الحرارة، والملوحة، وتأثير ضوء الشمس في حدِّه الأدنى. يغطي هذا الموئل قرابة ٩٠ في المائة من حجم المحيط غير أن هذه المنطقة الشاسعة لا تزال أقلَّ البيئات دراسةً وفهمًا على هذا الكوكب. لكي تتضح الصورة، رسم علماء المحيطات حتى الآن خرائطَ من نحوِ ١٠ إلى ١٥ في المائة من مساحة قاع المحيط العالمي باستبانةٍ قدرُها نحو ١٠٠ متر، في حين رسم علماء الفلك خرائطَ شبه كاملة لسطحِ كلٍّ من الزهرة، والمريخ، والقمر بالكامل وبدقةٍ مماثلة، كما رسموا خرائطَ جزءٍ كبيرٍ من كوكب المريخ باستبانةٍ قدرُها نحو ٢٠ مترًا، وجزءٍ كبير كذلك من القمر باستبانةٍ تصل إلى سبعة أمتار. ومن ثَم فإننا نعرف عن جغرافيا الأجسام في نظامنا الشمسي أكثرَ مما نعرفه عن أكبر موئل على سطح كوكبنا. علاوة على ذلك، لم يُرسم حتى وقتنا الحاضر سوى نحو ٠٫٠٥ في المائة من أرضية محيطات الكوكب بالقدْر من التفصيل الذي يُمكِّننا من تبيُّنِ سماتٍ لا تتعدى في حجمها بضعة أمتار. حتى إنَّ قدرًا أقلَّ بكثير من ذلك قد كُشف عنه من أرضية المحيط عبر الغواصات المأهولة والمرْكبات المدارة عن بُعد. بالمقارنة، نجد أن ١٢ شخصًا قد أمضَوا ما مجموعه ٣٠٠ ساعة على سطح القمر، بينما أمضى ثمانيةُ أشخاص أقلَّ من ١٩ ساعة من الاستكشاف في منطقة التحدي العميق، التي هي أعمقُ جزء في المحيط العالمي.

البيئة الفيزيائية لأعماق المحيطات

تخلو أعماق المحيطات، فيما عدا بالقرب من حدودها العليا، من ضوء الشمس، الذي تعجز بقاياه الأخيرة أن تخترقَ عمقًا يتجاوز ٢٠٠ متر في معظم أجزاء المحيط العالمي، أو أكثر من ٨٠٠ متر أو نحو ذلك، حتى في أكثر مياه المحيطات صفاءً.

يُشكِّل الضغط الشديد سمةً مميزة أخرى لأعماق المحيطات. فمياه البحر تُعد مادةً ثقيلة، ويمكن لعمودٍ من مياه البحر يبلغ ارتفاعه ١٠ كيلومترات — وهو الارتفاع المعتاد في الأجزاء الأكثرِ عمقًا من المحيط العالمي — أن ينتج عنه ضغط قدره ١٠ آلاف طن لكل متر مربع، وهو ما يعادل وزن ٥٥ طائرة جمبو نفاثة.

باستثناء عددٍ قليل من الأماكن المعزولة للغاية، تتميز أعماق المحيطات بكونها بيئةً باردة طوال العام، حيث تبلغ درجات حرارة البحر عادةً ما يتراوح بين نحو درجتين مئويتَين إلى أربع درجات مئوية. وحيث تقع أعماق المحيطات في الغالب تحت منطقة الحد الأدنى للأكسجين؛ إذ عادةً ما توجد على أعماقٍ تتراوح من نحو ٢٠٠ إلى ١٠٠٠ متر، فإن تركيزات الأكسجين الذائب تكون عادةً أكثرَ من القدْر الذي يمكن أن تعيش فيه الكائنات الحية.

يندُر كذلك الغذاءُ في أعماق المحيطات. فنظرًا إلى غياب ضوء الشمس، ليس ثمة إنتاجٌ أوَّلي للمواد العضوية عن طريق البناء الضوئي. وإنما تتكون قاعدة السلسلة الغذائية في أعماق المحيطات في الغالب من وابل «الثلج البحري»، وهي موادٌّ عضوية دقيقة (POM) تغوص ببطءٍ عبر عمود الماء من سطح مياه المحيط المضاء بنور الشمس. يُستكمَل هذا بالأجسام الكبيرة للأسماك والثدييات البحرية التي تغوص أسرعَ إلى القاع بعد نفوقها، حيث توفِّر ولائمَ على فترات متفرقة للكائنات التي تعيش في أعماق المحيطات.

وهكذا فإن الصورة التي تطرأ على الأذهان عن أعماق المحيطات هي أنها ذلك الموئل البارد، والمظلم، والمضغوط بشكل هائل، والمحدود في مغذياته؛ أي تلك البيئة القاسية والشاقة للغاية من منظور الإنسان. إلا أن هذا الموئل الهائل يمتلك تنوعًا كبيرًا في الحياة البحرية المُهيَّئة ببراعةٍ للعيش في ظل هذه الظروف.

سُبل تكيُّف حيواناتِ أعماق المحيطات

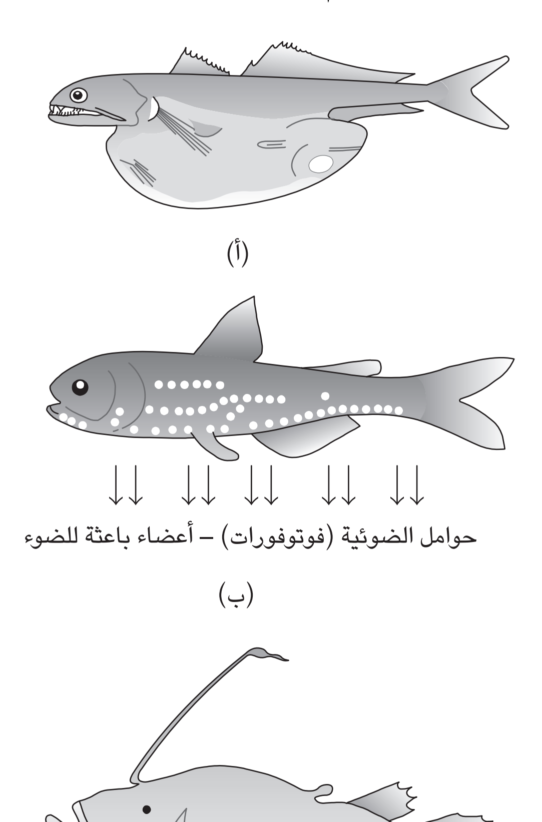
في بيئة منطقة البحر المفتوح لأعماق المحيطات، ينبغي أن تكون لدى الحيوانات القدرةُ على الحفاظ على حياتها في العمق المناسب دون إهدار طاقتها في بيئتها الفقيرة بالغذاء.

عادةً ما يتحقَّق هذا عن طريق تقليل الكثافة الإجمالية للحيوان إلى كثافة مياه البحر بحيث تكون متعادلة الطفو. لذلك، غالبًا ما تكون أنسجةُ أسماك أعماق المحيطات وعظامها لينةً ومائعة. كما تُهيمن على بيئة منطقة البحر المفتوح في أعماق المحيطات الحيوانات الجيلاتينية مثل قنديل البحر، والسَّحَّاريَّات، والمشطيات، والسالبيات التي تقترب كثافةُ أجسامها من كثافة مياه البحر.

نظرًا إلى ندرة الغذاء في بيئة أسماك أعماق المحيطات؛ فإن تلك الأسماء تجد نفسها مضطرةً إلى الاستفادة الكاملة من كل وجبة تتوفَّر لها. فبالمقارنة بالأسماك في المحيط الضحل، يمتلك العديد من أسماك أعماق المحيطات أفواهًا كبيرة للغاية قادرةً على فتحها باتساعٍ كبير، وعادةً ما تكون مزوَّدة بعدةِ أسنان طويلة، وحادة، ومدبَّبة للداخل. من الأمثلة الجيدة على ذلك ثعبان البحر البجع، وسمكة أبو الشِّص، والأسماك ذات الفك المرتخي، وسمك المبتلع الكبير (انظر شكل ٦-١(أ)). يمكن لهذه الأسماك التقاطُ فريسةٍ أكبر من حجمها وابتلاعُها كي لا تفوِّت وجبةً نادرة لمجردِ كِبر حجمها. كما تمتلك هذه الأسماك مَعِدة قابلة للتمدد إلى حدٍّ كبير كي تستطيع استيعاب مثل هذه الوجبات.

على الرغم من عدم اختراق أي ضوء للشمس لأعماق المحيط؛ فإن هذه الأسماك تتلألأ بفضلِ نوع آخَر من الضوء البيولوجي المصدر، والمتمثل في الوهج والوميض الناتجَين عن ضيائيتها الحيوية. وتَنتُج هذه الظاهرة عن تفاعلٍ كيميائي في أعضاءٍ مُهيَّئة لهذا الغرض تُعرف بالحوامل الضوئية (الفوتوفورات) والموجودة في أجسام العديد من حيوانات أعماق المحيطات بما في ذلك الأسماك، والأخاطب، والحبار، وقنديل البحر، والديدان، والقشريات، ونجوم البحر. تُنتِج الحيوانات بشكلٍ عام الضوءَ بأنفسها، ولكنها في بعض الحالات تطوِّر علاقة تكافلية مع البكتيريا المُضيِئة حيويًّا التي تُنتِج الضوء.

تُمثِّل الضيائية الحيوية إحدى سُبل التكيف الرئيسية في أعماق المحيطات، وقد تطورَت في العديد من مجموعات الحيوانات المختلفة كلٌّ على حدة؛ لخدمة وظائفها الحيوية مثل التزاوج، وإيجاد الطعام، وتجنُّب المفترسات. على سبيل المثال، تمتلك الأسماك الفانوسية صفوفًا من الحوامل الضوئية على طول بطونها وجوانبها، التي ينبعث منها ضوء أزرق، أو أخضر، أو أصفر (انظر شكل ٦-١(ب)). هذه الحوامل مرتَّبة في نمطٍ خاص بكل نوع من أنواع الأسماك الفانوسية، وفي بعض الأنواع يختلف النمطُ في الذكور عنه في الإناث. كما تُمكِّن الأعين الكبيرة هذه الأسماكَ من ملاحظة الضوء المنبعث



شكل ٦-١: أمثلة لأسماك أعماق المحيطات: (أ) مبتلِع كبير وقد ابتلع فريسة من الأسماك، (ب) سمكة فانوسية تظهر الحوامل الضوئية على طول جانبها وبطنها، (ج) سمكة أبو الشِّص ملتصق بها ذكر طفيلي.

من أسماك أخرى من النوع نفسه؛ الأمر الذي يُستخدم للتواصل والعثور على الشركاء من أجل التزاوج في بيئة أعماق المحيط الشاسعة.

تستخدم بعض أسماك أعماق المحيطات خاصيةَ الضيائية الحيوية لجذب الفرائس النادرة. تمتلك سمكة أبو الشِّص لوامسَ طويلة ومرنة — أشبه بقصبات صيد — تمتدُّ لأعلى بين عينيها، وفي نهايتها عضو مضيء يُسمى «إسكا» (انظر شكل ٦-١(ج)). تلتوي الإسكا لتشبه سمكةً صغيرة تعمل وسيلةَ إغراء لجذب الفريسة بالقرب الكافي لابتلاعها كاملةً. ويعمل لمس الإسكا على الفور على تحفيز الفكَّين للانفتاح على طريقة الباب المسحور. تشيع الاختلافات في هذا الأمر بين أسماك أعماق المحيطات؛ إذ يمتلك العديدُ منها زوائدَ باعثةً للضوء بالقرب من فكيها وتعمل كوسيلة لإغراء الفرائس.

تستخدم العديد من حيوانات أعماق المحيطات خاصيةَ الضيائية الحيوية للدفاع عن أنفسها ضد المفترسات. على سبيل المثال، عندما تقترب من حبار مصاص الدماء سمكةٌ من المفترسات، تُنتِج مجموعة من الومضات تبثُّ الرعب في الكائن المفترس. وإذا زاد الهجوم عليه، يُطلق سائلًا مليئًا بجزيئاتٍ مضيئة تُغلِّف المفترس وتساعد الحبار نفسه على الهروب.

يُعد العثور على شريكٍ للتزاوج في أعماق المحيطات تحديًا. غير أن سمكة أبو الشِّص قد حلت هذه المشكلة من خلال أسلوبِ تكيُّفٍ غير عادي؛ إذ تختزل ذكورُ معظم أنواع هذه السمكة حجمها لتصبح في هيئةٍ طفيلية صغيرة تعلَق بشكلٍ دائم بالإناث التي تكبُرها بكثير في الحجم (انظر شكل ٦-١(ج)). يلتصق فمُ الذكر بجسم الأنثى وتندمج أوعيته الدموية بأوعيتها. بذلك يكون الذكر حاضرًا دائمًا لتخصيب بويضات الأنثى، مما يُغني الأنثى عن الحاجة إلى العثور على ذكرٍ في وقت التكاثر. بالطبع يصبح على الذكر القَزمِ في المقام الأول تحديدُ موقع الأنثى، وعلى الأرجح يكون ذلك عن طريق الرائحة أو الانجذاب إلى الإسكا المُضيئة حيويًّا، ولكن بمجرد التصاقه بالأنثى تكون مسألة العثور على شريكٍ للتزاوج قد حُلت.

ليس مُستغرَبًا أنَّ حيوانات أعماق المحيطات قد اكتسبَت أساليبَ للتكيف في بيئةٍ شديدة الضغط. لا تؤثِّر هذه الضغوط الشديدة على بِنيات تلك الحيوانات فحسب، بل إن لها أيضًا تأثيراتٍ عميقةً على فسيولوجيتها وكيميائها الحيوية. فالضغط الشديد يؤثِّر على فسيولوجيا أغشية الخلايا عن طريق ضغطها وطرد سوائلها، وجعلها أكثرَ صلادة، ومن ثَم أقلَّ قدرة على توجيه المغذيات والنُّفايات إلى داخل الخلية وخارجها. اكتسبت كائناتُ أعماق المحيطات أساليبَ تكيفيةً عبر كيميائها الحيوية للمحافظة على أداء أغشية خلاياها تحت الضغط، وتشمل هذه الأساليب تعديلَ أنواع جزيئات الدهون (الليبيدات) الموجودة

في الأغشية من أجل الحفاظ على سيولة الغشاء تحت الضغط المرتفع. تؤثِّر الضغوط العالية أيضًا على جزيئات البروتين، مما يعوقها في كثيرٍ من الأحيان من الانطواء لاتخاذ الأشكال الأنسب لعملها بكفاءة كأنزيمات أيضية. في ردِّ فِعلها على ذلك طوَّرَت حيوانات أعماق المحيطات سلالاتٍ جديدة من الإنزيمات الشائعة المقاومة للضغط، والتي تُخفِّف من هذه المشكلة.

الهجرة الجماعية من أعماق المحيطات

تُظهر جموعٌ غفيرة من العديد من أنواع حيوانات أعماق المحيطات سلوكًا غير عادي؛ إذ تقوم برحلةٍ عمودية يومية من الأعماق إلى المياه الضحلة، فيما ربما يُعد أكبرَ هجرة للحيوانات على كوكب الأرض. فعندما يجتاح غروبُ الشمس المحيطات، تسبح إلى أعلى أعدادٌ كبيرة من الحيوانات البحرية بما في ذلك مجذافيات الأرجل، والجمبري، وقنديل البحر، والحبار، والسالبيات، والأسماك من أعماقٍ تصل إلى ١٠٠٠ متر أو أكثر نحو السطح. يُقدَّر أن نحو خمسة مليارات طن من الحيوانات تتحرك نحو السطح كلَّ ليلة، بما في ذلك أعدادٌ ضخمة من الأسماك الفانوسية، وهي أحد أكثر الأسماك وفرةً في الطبقات الوسطى لمياه المحيطات. وعند شروق الشمس يرجع هذا التجمعُ من حيوانات منطقة البحر المفتوح ليغوص في الأعماق مرةً أخرى. تتميز كتلة الحيوانات المهاجرة بأنها شديدة الكثافة لدرجةٍ تجعلها تعكس الموجات الصوتية من أنظمة سونار السفن، فتظهر على هيئة «قاع زائف» مميز في الطبقات الوسطى للمياه، يُعرف باسم طبقة التشتُّت العميقة (DSL). يبدو أن التغيرات اليومية في مستوى الضوء تُمثل إشارةَ توجيه مهمة لمواصلة الهجرة، وإن كانت الهجرة العمودية تحدُث أيضًا تحت جليد القطب الشمالي أثناء الظلام المستمر في الشتاء. لا بد إذن أن تلك الكائنات تمتلك ساعةً بيولوجية داخلية.

لا بد أيضًا أن الكائنات المشاركة في هذه الهجرة الجماعية تجني بعض الفوائد الكبيرة من قيامها بهذه الرحلة الهائلة يومًا. والتفسير الأكثر قبولًا حاليًّا هو أن العوالق الحيوانية، مثل مجذافيات الأرجل، تهاجر إلى السطح لتتغذَّى على العوالق النباتية في الليل؛ فمن المفترض أن مجذافيات الأرجل تصبح أقلَّ وضوحًا في الظلام للمفترسات مثل الأسماك، التي تشهد وفرةً أكبرَ في المياه الضحلة. ثم تغادر بعد ذلك الطبقةَ المضاءة خلال النهار لتفادي رؤيةِ المفترِسات لها. وعلى الأرجح أن الأسماك الفانوسية وغيرها من الكائنات المستهلكة الصغيرة الأخرى تقوم بالهجرة كذلك لتجنُّب المفترسات، ولكي

تتبع طعامها من العوالق الحيوانية. من شأن هذه الهجرة أيضًا أن تمنح الطاقةَ لبعض الكائنات المشاركة فيها؛ حيث تقضي اليوم في مياهٍ شديدة العمق والبرودة تنخفض فيها معدَّلاتُ التمثيل الغذائي فيمكنها الحفاظ على طاقتها أثناء هضم وجبتها الليلية.

تدفُّق الطاقة في أعماق المحيطات

يأتي جميع غذاء الكائنات الحية في أعماق المحيطات تقريبًا من الإنتاج الأوَّلي في الطبقة المضاءة. يكون هذا الطعام في هيئةِ موادَّ عضوية ميتة تغوص من سطح المحيط كالثلج البحري. ويتكوَّن من كتلٍ، أو مجاميع، لزجة صغيرة من جُسيمات عضوية تشتمل على خلايا عوالق، وعوالق حيوانية ميتة، وكُريات برازٍ تُنتِجها العوالق الحيوانية. تغوص هذه المجاميع ببطءٍ عبر عمود الماء بمعدَّلٍ يتراوح من نحو ١٠٠ إلى ٢٠٠ متر في اليوم. وهكذا يستغرق الأمر منها أسابيعَ للوصول إلى أرضية المحيط العميق. على طول الطريق، تستخلص البكتيريا القيمة الغذائية في تلك المجاميع في عمود الماء؛ ومن ثَم كلما غاصت أعمق، زاد استنفادُ ما بها من موادَّ مغذية. عندما تصل هذه الموادُّ العضوية في النهاية إلى أرضيةِ المحيط، فما يتبقَّى من طاقةٍ غذائية تستخدمه حيوانات القاع. بعضها آكلةٌ للعوالق مهيَّأة لتصفية الجسيمات العضوية المعلَّقة في طبقةٍ من مياه البحر فوق القاع مباشرة. وبعضها الآخر آكلاتٌ للرواسب؛ إذ يمكنها استهلاك المواد العضوية التي تراكمَت على الرواسب السطحية أو في داخلها. أما اللافقاريات القاعية المفترسة فتتغذَّى على آكلات الجسيمات هذه، بينما تقتاتُ أسماك القاع على الحيوانات القاعية.

نظرًا إلى أن المواد العضوية تتراكم في القاع على مدار فترات شديدة الطول، تحتوي رواسبُ أعماق المحيطات على نسبةٍ كبيرة من المواد العضوية في شكلِ موادَّ عضوية ذائبة ومواد عضوية دقائقية، تُشكِّل الأساسَ للشبكة الغذائية الميكروبية، حيث تستهلك البكتيريا والعتائقُ الوفيرة هذه الموادَّ مصدرًا للغذاء. تحتوي الرواسب أيضًا على أعدادٍ غير عادية من الفيروسات، نحو مليار لكل جرام من الرواسب. وهذا يخلق حلقةً فيروسية عن طريق إصابة البكتيريا والعتائق التي تُطلِق موادَّ عضوية ذائبة وموادَّ عضوية دقائقية مرةً أخرى في الرواسب وعمود المياه عند موتها. يبدو أن قدرًا كبيرًا من هذه الطاقة يُعاد تدويره بسرعةٍ داخل الحلقة الفيروسية، ولا يتوفر الكثير منها للكائنات الأكبر مثل الطلائعيات والعوالق الحيوانية الأكبر.

تنوُّع حيوانات القاع في أعماق المحيطات

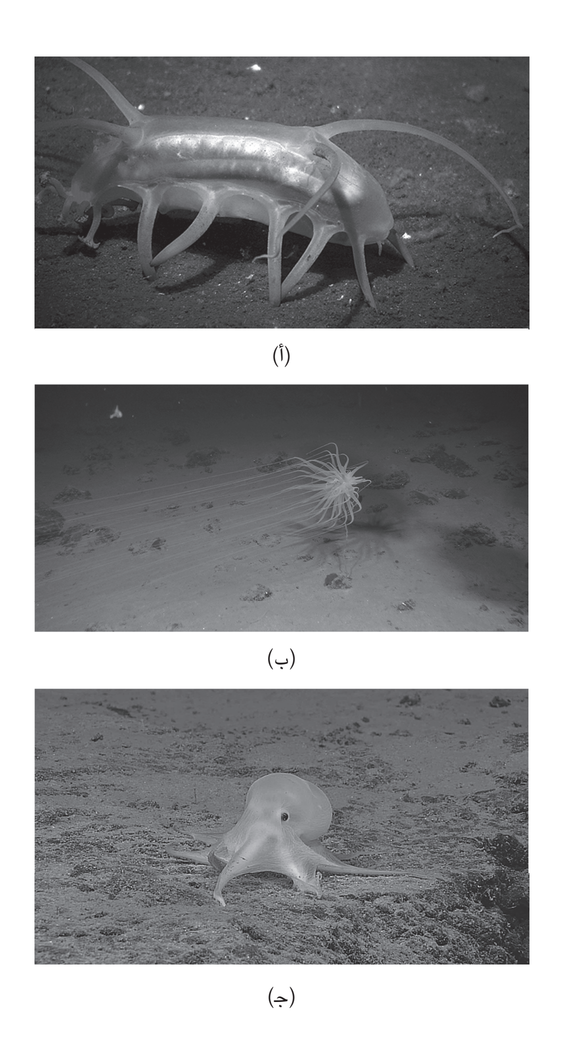
كان قاع أعماق المحيطات فيما مضى يُعد صحراء بيولوجية، ولكن مع الحصول على المزيد من العينات العاليةِ الجودة في ستينيَّات القرن العشرين والمزيد من المشاهدات التي تمكنَت منها الغواصات وكاميرات المركبات التي تعمل عن بُعد، بدا واضحًا أن ثمة مجموعةً متنوعة ومذهلة من الحيوانات تعيش في أرضية أعماق المحيطات. يشمل هذا أنواعًا مختلفة من اللافقاريات الآكلةِ للعوالق مثل الإسفنج، وزنابق البحر، وأقلام البحر، وشقائق النعمان البحرية، ومراوح البحر، والديدان المروحية، كذلك الحيوانات التي تتغذى على الرواسب مثل الديدان، وخيار البحر، ونجوم البحر الهشة، وقنافذ البحر، والحلزونات الصدفية، إضافةً إلى المفترسات مثل قنافذ البحر، ونجوم البحر، وشقائق النعمان البحرية، ومزدوجات الأرجل، والأخاطب (انظر شكل ٦-٢).

مجتمعات المَنافس المائية الحرارية والمسارب الباردة

الفكرة القائلة بأن جميع الأطعمة الموجودة في أعماق المحيطات تأتي من السطح ليست صحيحةً تمامًا. فهناك بعض المواقع المميزة للغاية في أرضية المحيط العميق يتكون فيها الطعام في مكانه. وهذا شكلٌ من أشكال الإنتاج الأوَّلي الذي لا تُحركه الطاقة المستمَدة من ضوء الشمس، وإنما الطاقة الموجودة في المرْكبات الكيميائية. فالمَنافس المائية الحرارية الغائصة تُمثل أحد الأمثلة على الحياة في أعماق المحيطات التي تُديرها الطاقة الكيميائية.

اكتُشفَت المنافس المائية الحرارية عبر غواصة المسافات العميقة «ألفين» Alvin في عام ١٩٧٧ على حافة أحد المحيط بالقرب من جزر جالاباجوس على عمق نحو ٢٧٠٠ متر. منذ ذلك الحين اكتُشف العديد من المنافس المائية الحرارية الأخرى في جميع أنحاء المحيط العالمي، التي غالبًا ما تكون على حافات المحيطات، وقد قُدِّر أن آلاف المنافس في أرضية المحيطات نشطةٌ طوال الوقت.

تنشأ المَنافس المائية الحرارية عندما تتسرَّب مياهُ البحر إلى أرضية أعماق المحيطات حيث تتفاعل مع الصخور الساخنة لتُشكِّل سائلًا فائقَ التسخين مُحمَّلًا بالمواد الكيميائية. يخرج هذا السائل في حالات الضغط المرتفع إلى المحيط عبر الشقوق كما في فوَّارة مياهٍ حارة. في الغالب تتجمع العديد من تلك الفوَّارات معًا لتُشكِّل حقولًا من المنافس التي تتراوح أحجامها من حجم طاولة بلياردو إلى حجم ملعب تنس.



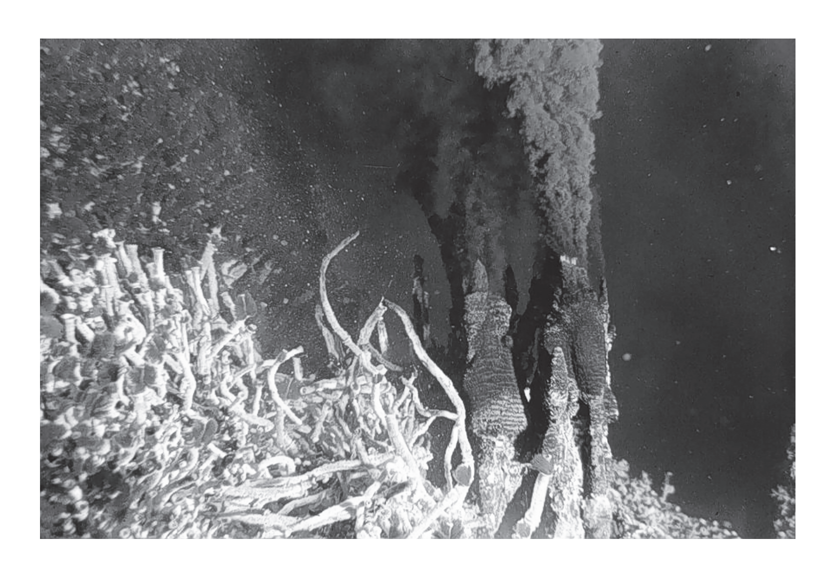
(أ)

(ب)

(جـ)

شكل ٦-٢: التنوُّع القاعي في أعماق المحيطات: (أ) خيار البحر على عمق ٢٦٦٠ مترًا. ملاحظة: الفم (ف) محاطٌ بحلقة من لوامس التغذية التي تلتقط جزيئات الطعام من الرواسب، (ب) حيوان شبيه بشقائق النعمان ملتصقٌ بساق إسفنج على عمق نحو ٤٠٠٠ متر، وقد يصل طول اللوامس إلى مترين، (جـ) الأخطبوط المُسمَّى بالأخطبوط الشبحي «كاسبر» على عمق ٤٠٠٠ متر.

عادةً ما تُخرِج المَنافس المائية الحرارية سائلًا أسودَ اللون من خلال هياكلها الشبيهة بالمدخنة، التي قد يصل ارتفاعها إلى عشرات الأمتار (انظر شكل ٦-٣). يكون السائل المنبثق من «فوَّهات الدخان السوداء» هذه عاليَ الحمضية وداكنًا بفعل الجزيئات المعدنية الصغيرة المعلَّقة التي تحتوي على الكبريت، والتي تترسب من السائل المنبثق أثناء اختلاطه بمياه البحر الباردة المحيطة. يمكن أن تتجاوز درجةُ حرارة السائل المنبثق من فوهات الدخان السوداء ٤٠٠ درجة مئوية في لحظة خروجه من أرضية المحيط. تُشكِّل أنظمةٌ أخرى للمَنافس المائية الحرارية، تُسمى «فوهات الدخان البيضاء»، مداخنَ بيضاءَ من كربونات الكالسيوم، ويمكن أن يبلغ ارتفاعها ٦٠ مترًا وتُخرِج سائلًا أفتح لونًا شديدَ القلوية عند درجات حرارة منخفضة ويحتوي على كميات كبيرة من الهيدروجين والميثان.



شكل ٦-٣: كتلة من الديدان الأنبوبية (يسار الصورة) تنعم بمياه البحر الدافئة بالقرب من فوهة دخان سوداء، تقذف سائلًا درجة حرارته ٤٠٠ درجة مئوية على عمق ٢٢٥٠ مترًا.

تزدهر أنواعٌ كثيرة من البكتيريا والعتائق بالقرب من المَنافس المائية الحرارية. فهي تستخدم المركَّبات الكيميائيةَ الموجودةَ في السوائل المنبثقة، بما في ذلك كبريتيد الهيدروجين، والهيدروجين، والميثان؛ مصدرَ طاقة لإنتاج مركَّبات عضوية مثل الجلوكوز. لم تتَّضح

تمامًا حتى الآن تفاصيلُ بعض عمليات التمثيل الكيميائي المختلفة التي تستخدمها البكتيريا والعتائق في مواقع المَنافس المائية الحرارية. غير أن إحدى العمليات المستخدَمة على نطاقٍ واسع تتضمن تكسير كبريتيد الهيدروجين (H_2S) لتكوينه الطاقةَ؛ من أجل إنتاج مركَّبات عضوية من ثاني أكسيد الكربون الذي تمتصُّه من مياه البحر. ويمكن تلخيص العملية بالمعادلة التالية:

$$6O_2 + 6H_2S + 6CO_2 + 6H_2O \longrightarrow C_6H_{12}O_6 + 6H_2SO_4$$

مركَّبات عضوية   حمض الكبريتيك

يتطلب هذا الشكلُ من أشكال التمثيل الكيميائي الأكسجينَ لإدارة العملية، من ثَم يُعرف باسم التمثيل الكيميائي الهوائي. فهو يرتبط في الأساس بضوء الشمس؛ لأن البناء الضوئي هو مصدر الأكسجين على الكوكب. من ناحيةٍ أخرى، لا تحتاج الكائنات الدقيقة التي تقوم بالتمثيل الكيميائي، الذي يستخدم الهيدروجين أو الميثان من فوهات الدخان البيضاء مصدرًا للطاقة، إلى الأكسجين، وهي العملية المسمَّاة بالتمثيل الكيميائي الهوائي. علاوةً على ذلك، فإن الهيدروجين والميثان اللذين تستخدمهما للحصول على الطاقة يمكن توليدهما عبْر عمليات جيوكيميائية بحتة تُجرى تحت أرضية المحيط. وهكذا، فإن هذا الشكل من أشكال الإنتاج الأوَّلي عبر التمثيل الكيميائي يدعم شكلًا أخَّاذًا وقد يبدو غريبًا إلى حدٍّ ما من أشكال الحياة التي لا تربطها صلةٌ بالشمس والبناء الضوئي المعتمد على الضوء.

تدعم البكتيريا والعتائق التي تقوم بالتمثيل الكيميائي والموجودة في بيئات المَنافس مجتمعًا حيوانيًّا مذهلًا يضم الحلزونات الصدفية العملاقة، وبلح البحر العملاق، وأنواعًا مختلفة من سرطانات البحر، والبطلينوس، وشقائق النعمان البحرية، والديدان، والجمبري، ومزدوجات الأرجل، وبرنقيل الأوز، والأخاطب، والأسماك. لم تكن معظم الأنواع الموجودة في المَنافس معروفةً في السابق قبل اكتشاف المَنافس، وليس لها وجودٌ في مكانٍ آخرَ إلا في أنظمة المَنافس.

بعض البكتيريا والعتائق المستقلة العيش، عالقةٌ في أعمدة المَنافس أو تُشكِّل ما يُشبه الحصائر على القاع الصخري المجاور للمَنافس. وتعمل بعض الحيوانات الموجودة في المَنافس، مثل الحلزونات الصدفية وبلح البحر، على تصفية هذه الكائنات الحية الدقيقة من مياه البحر، بينما يرعى بعضُها الآخر، مثل البطلينوس، على تلك الحصائر الميكروبية.

غير أن معظم الحيوانات التي تعيش عند المنافس لا تتغذَّى مباشرةً على هذه الكائنات الدقيقة المستقلة العيش. فقد طوَّرت بدلًا من ذلك علاقاتٍ تكافليةً معقَّدة مع بكتيريا التمثيل الكيميائي التي تستمدُّ منها غذاءها. من الأمثلة الجيدة على ذلك الدودة الأنبوبية العملاقة، «ريفتيا باتشيبتيلا»، التي توجد بوفرةٍ في العديد من مواقع المَنافس في المحيط الهادي (انظر شكل ٦-٣). تعيش هذه الديدان الغريبة داخلَ أنابيب واقية بيضاء يصل طولها إلى مترين أو أكثر، وليس ثمة أثرٌ لوجود جهاز هضمي لدى البالغين منها. وتمتلك عمودًا أحمرَ لامعًا يمكن تمديده من أنابيبها لامتصاص كبريتيد الهيدروجين والأكسجين من محيطها. ثم تنتقل هذه المواد الكيميائية داخل الجهاز الدموي للدودة إلى هيكلٍ خاص شبيهٍ بالمَعِدة يُسمى بجسم التغذية، مليءٍ ببكتيريا التمثيل الكيميائي التي تُنتِج الغذاء لنفسها ولمضيِّفتها الدودة الأنبوبية. طوَّرَت أنواعٌ أخرى من تلك التي توجد في المَنافس أشكالًا أخرى من أشكال العلاقات التكافلية مع بكتيريا التمثيل الكيميائي. على سبيل المثال، تتغذى سرطانات البحر اليتي، وهي سرطانات بحر يبلغ طول الواحد منها ١٥ سنتيمترًا ولم يُكتشف إلا في عام ٢٠٠٥ في المَنافس بجنوب جزيرة الفصح، على بكتيريا التمثيل الكيميائي التي يربيها فوق جسمه. ويحتضن الحلزون الصدفي العملاق وبلح البحر في المَنافس بكتيريا التمثيل الكيميائي في أنسجة خياشيمها. توفِّر المادة العضوية التي تُنتجها البكتيريا معظم الطعام للحلزون الصدفي العملاق وبلح البحر، وعلى الرغم من قدرتها على التغذية بالترشيح، فإنها ستموت من دون التغذية التي يُنتجها شركاؤها التكافليون.

تُعرف المَنافس المائية الحرارية بكونها إحدى سمات أعماق المحيطات غير المستقرة وقصيرة الأجل. فالمشاهدات المتكرِّرة لأنظمة المنافس تُظهر أن معدَّل التدفُّق والتركيب الكيميائي للسوائل المنبثقة من شأنه أن يختلف على مدى أشهر، وقد لوحظت مَنافس نافقةٌ تحيط بها بقايا مجتمعات من المنافس. يُرجَّح أن مدة عمر المَنافس النموذجية في حدود عَقد إلى قرن. ونظرًا إلى أن العديد من حيوانات المَنافس لا يمكنها العيش إلا بالقرب من المَنافس، وأن المسافة بين أنظمة المنافس يمكن أن تبلغَ مئات أو آلاف الكيلومترات؛ فمن المحيِّر كيف تهرب حيوانات المَنافس من المَنافس المحتضرة وتستعمر منافسَ بعيدة أو أخرى تكونَت حديثًا. من المعروف أن بعض حيوانات المَنافس تنمو بسرعة كبيرة ويمكن أن تصل إلى أحجامٍ كبيرة وإلى النضج الجنسي قبل نُفوق المَنافس. على سبيل المثال، يمكن للدودة الأنبوبية العملاقة أن تنموَ إلى مترين في العام الواحد. ونظرًا إلى حجمها الكبير، يمكن للعديد من حيوانات المنافس أن تُنتج أعدادًا كبيرة من اليرقات

العوالقية لدرجةٍ أن تيارات أعماق المحيط البطيئة الحركة قد تتشتَّت على مسافات طويلة، مما يسمح لها باستعمار مواقع المَنافس الأخرى. في بعض الأنواع، قد ترتفع اليرقات إلى السطح حيث تنتشر بسرعةٍ أكبرَ مع تيارات السطح قبل أن تغوص مرةً أخرى في أرضية المحيط حيث تجد موقعَ مَنافسَ مناسبًا لاستعماره.

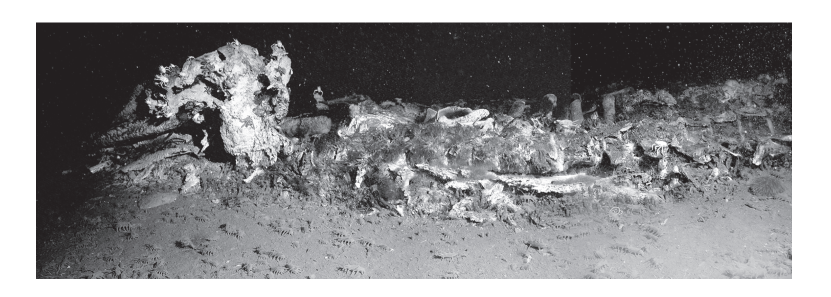
المَنافس المائية الحرارية ليست المصدرَ الوحيد للسوائل المحمَّلة بالمواد الكيميائية التي تدعم المجتمعات الفريدة القائمة على التمثيل الكيميائي في أعماق المحيطات. فكبريتيد الهيدروجين والميثان يتسرب أيضًا من قاع المحيط في العديد من المواقع بدرجاتِ حرارة مماثلة لمياه البحر المحيطة. ومنذ عام ١٩٨٣ اكتُشف العديد من هذه «المسارب الباردة» المنتشرة على طول الحافات القارية لجميع محيطات العالم على أعماقٍ من منطقة المد والجزر إلى أكثرَ من ٧٦٠٠ متر. تشبه المجتمعاتُ المرتبطة بالتسربات الباردة إلى حدٍّ كبير مجتمعاتِ المَنافس المائية الحرارية، مع وجود العديد من الحيوانات على علاقة وثيقة ببكتيريا التمثيل الكيميائي. فيمكن أن يوجد الحلزون الصدفي، وبلح البحر، والإسفنج، وسرطان البحر بوفرةٍ كبيرة، جنبًا إلى جنب مع أجماتٍ كثيفة من الديدان الأنبوبية. يبدو أن المسارب الباردة مصادرُ أكثر استدامةً للسوائل، مقارنةً بمَنافس الماء الساخن ذات الطبيعة المؤقتة. وهكذا، فعلى عكس مجتمعات المنافس المائية الحرارية، يمكن أن تمتلك مجتمعاتُ التسربات الباردة أنواعًا بطيئةَ النمو وطويلةَ العمر. على سبيل المثال، يُقدَّر أن بعض الديدان الأنبوبية في المسارب الباردة قد تبلغ أعمارها ٢٥٠ سنة أو أكثر.

سقوط الحيتان وغيرها من الثروات الغذائية في أعماق المحيطات

على الرغم من أن أعماق المحيطات تُمثِّل إحدى أكثر البيئات محدوديةً في غذائها على الكوكب، تصل حزمٌ كبيرة من الطعام إلى القاع، وتُكوِّن واحةً غذائية محلية لجمعٍ غفير من حيوانات أعماق المحيطات. جثث الحيوانات البحرية الكبيرة التي سرعان ما تغرَق في حالةٍ سليمة هي مصدرٌ لتلك الوفرة الغذائية.

اكتُشفت مواقعُ لـ «سقوط الحيتان»، حيث تغوص جثث الحيتان النافقة في أرضية المحيط العميق، (انظر شكل ٦-٤)، عبر الغواصات وباستخدام أجهزة المسبار الصوتي للمسح الجانبي. كان يُفترض في السابق أن سقوط الحيتان من الأحداث النادرة في أعماق المحيطات، غير أن ثمة أدلةً متزايدة على أن مِثل هذه الولائم تتكوَّن بشكلٍ متكرر أكثرَ مما كان يُعتقد. وقد قُدِّر أنه في أيِّ وقت من الأوقات يوجد مئاتُ الآلاف من جثث الحيتان في

قاع المحيط العالمي في مراحلَ مختلفةٍ من تحلُّلها، حيث يوفِّر كلٌّ منها قيمةً غذائية تُعادل ما يوفره ما يقرب من ٢٠٠٠ عام من الثلوج البحرية المتراكمة في موقع الجثة. وقد حُسب متوسط المسافة بين سقوط كلِّ حوت وآخَر في أرضية المحيط بنحو ١٢ كيلومترًا، وربما أقل من ذلك بكثيرٍ تحت طرُق الهجرة ومناطق التكاثر والتغذية لأنواع الحيتان الأكثر وفرة. من المرجَّح أن سقوط الحيتان كان أكثرَ شيوعًا بكثيرٍ في أرضية المحيط العميق قبل الانخفاض الكبير في أعداد الحيتان الناتج عن الصيد البشري في القرن التاسع عشر إلى ستينيَّات القرن العشرين.



شكل ٦-٤: بقايا سقوط حوت في خندق مونيري قبالة سواحل كاليفورنيا. التقط هذه الصورةَ باحثا معهدِ بحوث ومتحف خليج مونتيري المائي روبرت فرييتهوك وشانا جوفريدي، أثناء غوصهما في فبراير عام ٢٠٠٢ باستخدام إحدى المركَبات التي تعمل عن بُعد، وهي المركبة تيبورون. يمثل «الزغب» (الأحمر) على عظام الحوت الآلاف من ديدان أعماق المحيطات التي تتغذى على الدهون والزيوت في العظام.

أول ما تصل هذه الجثثُ الكبيرة التي يبلغ وزنها من ٣٠ إلى ١٦٠ طنًّا إلى أرضية المحيط، تَعرف مجموعاتٌ كبيرة من آكلات الجيف المتنقلة مواقعَها من رائحتها خلال أيام، مثل أسماك الجريث، والراتيل، والقرش، وسرطان البحر، ومزدوجات الأرجل التي تُزيل بلا هوادة الكثيرَ من المواد اللحمية على مدار أشهُر إلى سنة، وذلك حسَب حجم الحوت. بعد ذلك، يستعمر عظام الحوت وكذلك الرواسب حول جثة الحوت، التي تُثريها موادُّ متكونةٌ من اللحم المتحلل، أعداد هائلة من الديدان، والقشريات، واللافقاريات الأخرى التي تستهلك على مدار العامين التاليَين الدهونَ والزيوت الموجودة في العظام والرواسب. ويشمل هذا الديدانَ المتخصصة، وتسمَّى الديدان العظمية، التي تمدُّ هياكلَ شبيهة بالجذور إلى

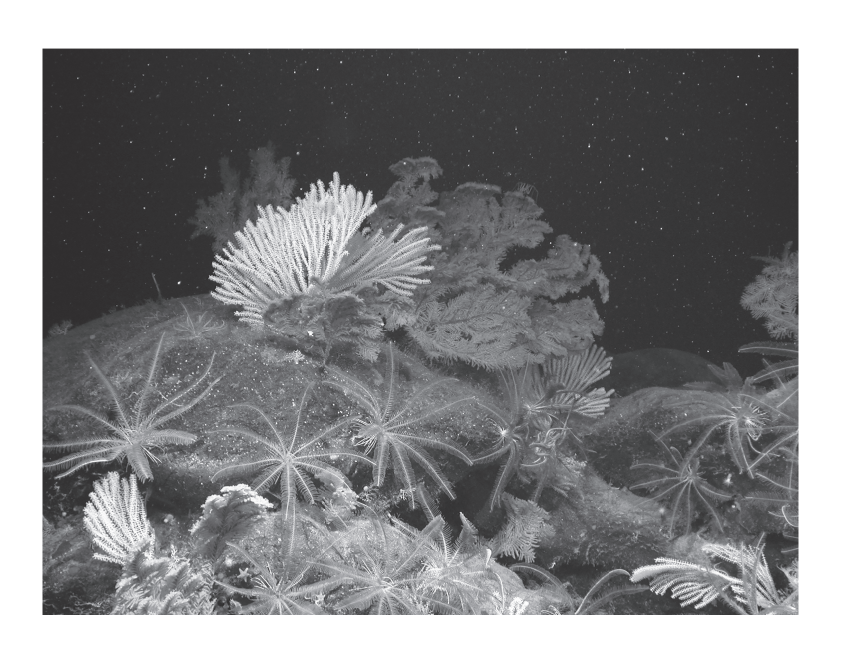
داخل عظام الحوت. تحتوي هذه «الجذور» على بكتيريا تساعد على هضم الدهون ونقل العناصر الغذائية للديدان. في المرحلة النهائية التي تستمر عقودًا، تستخدم بكتيريا التمثيل الكيميائي والحيوانات المَضيفة لهذه البكتيريا، مثل الحلزون الصدفي وبلح البحر، كبريتيدَ الهيدروجين المتسرِّبَ من المواد العضوية المتحللة في العظام والرواسب؛ مصدرًا للطاقة. ومن المثير للاهتمام أن العديد من أنواع الحيوانات التي تستعمر المرحلة الأخيرة من تحلُّل سقوط الحيتان عُثر عليها أيضًا في المَنافس المائية الحرارية والمسارب الباردة. لذلك، فمن الممكن أن تعمل بقايا سقوط الحيتان المتناثرة في أرضية المحيط بمنزلة «مَواطئ أقدام» ذات مسافات قصيرة فيما بينها، تُمكِّن هذه الأنواعَ من الانتشار بسهولةٍ أكبرَ عن طريق مراحلِ يرقاتها العوالقية عبر المسافات الكبرى التي تفصل بين مجتمعات المَنافس المائية الحرارية والمسارب الباردة.

الجبال البحرية: أنظمة بيئية فريدة في أعماق المحيطات

تُمثل الجبال البحرية مواقعَ لنشاطٍ بيولوجي كبير في أعماق المحيطات. فقد يمتد ارتفاعها المفاجئ من أرضية المحيط وقممها إلى آلاف الأمتار تحت سطح المحيط. وعلى عكس السهول السحيقة المسطحة ذات القاع الناعم المحيطة، توفِّر الجبال البحرية منصةً صخرية معقَّدة تدعم وفرةً من الكائنات الحية التي تختلف عن قاعيات أعماق المحيطات فيما حولها.

غالبًا ما يُهيمن على قمم الجبال البحرية وجوانبها مجتمعٌ عالي الكثافة يشبه الأدغال ويتألَّف من المرجان الصخري الذي يعيش في المياه الباردة، والشعاب المرجانية اللينة، ومراوح البحر، والمرجان الأسود، والإسفنج (انظر شكل ٦-٥). وعلى عكس الحال في المياه الضحلة والمرجانيات البانية للشعاب في المناطق الاستوائية، التي تحصل على كثيرٍ من طعامها عبر الحييونات الصفراء التي تقوم بالبناء الضوئي، تفتقر المرجانيات الصخرية في أعماق المحيطات إلى الحييونات الصفراء، وتعتمد فقط على ترشيح العوالق الحيوانية والجزيئات العضوية العالقة من مياه البحر. تنمو هذه الشعاب المرجانية الصخرية ببطءٍ شديد، وقد تُعمِّر عدةَ مئات من السنين. تُظهِر أنواع الشعاب المرجانية الأخرى في مناطق الجبال البحرية أعمارًا شديدة الطول أيضًا، حيث تمتدُّ أعمارها لآلاف السنين. على سبيل المثال، أظهر أحدُ أنواع المرجان الأسود، «ليوبثيس»، الذي أُخذت عيناتٌ منه من أحد الجبال البحرية في المحيط الهادي باستخدام الكربون المشع، أن عمره يرجع إلى

نحوِ ٤٢٠٠ عام، مما يجعله من بينِ أطول الحيوانات المستعمرة عمرًا في العالم. تُشكِّل هذه الأجماتُ التي يُهيمن عليها المرجان موئلًا لمجموعةٍ كبيرة من الحيوانات الأخرى مثل نجوم الريش، وزنابق البحر، والنجوم الهشة، ونجوم البحر، وخيار البحر، والبرنقيلات، وزقَّاقات البحر، والديدان، والجمبري وتجمُّعات غنيَّة من الأسماك.



شكل ٦-٥: نجوم ريش وشعاب مرجانية ليِّنة تعيش على عمق نحو ١٢٠٠ متر على جبل ديفيدسون البحري قبالة ساحل كاليفورنيا. التُقِطَت هذه الصورة عبْر مركَبة تُدار عن بُعد، تابعةٍ لمعهد بحوث ومتحف خليج مونتيري المائي، وهي المركَبة تيبورون، وذلك خلال الرحلات الاستكشافية التي موَّلها المكتب الوطني لاستكشاف المحيطات والبحوث التابع للإدارة الوطنية للمحيطات والغلاف الجوي ومؤسسة ديفيد ولوسيل باكارد (عبر معهد بحوث ومتحف خليج مونتيري المائي).

تقود الدافعَ وراء الإنتاجية العالية لمجتمعات الجبال البحرية عدةُ عوامل تختلف باختلاف عمق الجبل البحري وأنماط تيارات المحيط بجواره. فيمكن للجبال البحرية ذات القمم القريبة نسبيًّا من السطح أن تعيق طبقةَ التشتُّت العميقة التي تمتاز بالهجرة إلى الأسفل، مما يؤدي إلى محاصرةِ أعداد كبيرة من العوالق الحيوانية وتركزها كلَّ ليلة.

يوفر هذا مصدرًا للغذاء للمستهلِكات العالقة الوفيرة والأسماك التي تتغذى على العوالق. من شأنِ الجبال البحرية أيضًا أن تتأثر بالتيارات الأفقية التي تتدفق عبْرها وأن تُعدِّل فيها. يمكن أن يؤديَ هذا إلى تكوُّن «أعمدة تايلور»، أو دوامات من مياه البحر الدوارة التي تبقى فوق قمة الجبل البحري. ويمكن أن يؤديَ هذا أيضًا إلى الإبقاء على العوالق الحيوانية وتركيزها حول قمة الجبل البحري وجوانبه.

تدعم الجبالُ البحرية تنوعًا كبيرًا من أنواع الأسماك، بما يقرُب من ٨٠٠ نوع سُجِّل عيشها حول الجبال البحرية. ففي ستينيَّات القرن العشرين، بدأت سفن الصيد في أعماق المحيطات التي تبحث عن مخزونٍ جديد من الأسماك في الصيد في مناطق الجبال البحرية واكتُشفت تجمعات كبيرة من الأنواع المهمة تجاريًّا. أدى هذا إلى تكوُّن مصايد جديدة للأسماك تُركِّز على مناطق الجبال البحرية. فشِباك الصيد القاعية تُسحَب من القمة نزولًا إلى جوانب الجبال البحرية لاصطياد الأسماك. وتشمل أنواع الأسماك التجارية المستهدفة السمك الخشن البرتقالي، وسمك الأوريو، والفونسينو، والجراند، والسمك المسنن. لا تعيش هذه الأسماك بشكلٍ دائم عادةً في الجبال البحرية ولكنها تتجمع في الجبال البحرية في أوقاتٍ معينة من السنة للسَّرْء، أو للتغذِّي على الحبار والأسماك الصغيرة، أو لمجرد الراحة. وتتميز بالبطء الشديد في نموِّها، وبأعمارها الطويلة، وبنضجها في عمرٍ متقدم؛ ومن ثَم بانخفاض قدرتها على التكاثر. من الأمثلة الجيدة على ذلك السمكُ الخشن البرتقالي المعروف بأنه يعيش مدةً تزيد على ١٢٠ عامًا وبوصوله إلى مرحلة النضج في عمر الثلاثين تقريبًا، وبإنتاج إناثه أعدادًا قليلة نسبيًّا من البيض. يشيع مثلُ هذا المسار في حياة العديد من أنواع أسماك أعماق المحيطات.

كثيرًا ما توصف مصايد الجبال البحرية بأنها عمليات تنقيب وليست مصايدَ مستدامة للأسماك. فعادةً ما تنهار مصايدُ الأسماك في غضون سنوات قليلة من بدء الصيد؛ ومن ثَم تنتقل شِباك الصيد إلى الجبال البحرية الأخرى غير المستغَلَّة للحفاظ على المصايد. ستكون استعادةُ مصايد الأسماك المحلية حتمًا بطيئةً للغاية بسبب انخفاض قدرة هذه الأنواع من أسماك أعماق المحيطات على التكاثر.

إن تدمير مخزون الأسماك ليس مبعثَ القلق الوحيد المرتبط بالصيد في مناطق الجبال البحرية. فالصيد في الجبال البحرية يتسبَّب في أضرارٍ واسعة النطاق للمجتمعات المرجانية الهشة؛ إذ لا تحصد شِباكُ الصيد الأسماكَ فحسب، بل تحصد كذلك أعدادًا كبيرة من المرجان الصخري، والمرجان الأسود، والحيوانات القاعية الأخرى التي تعيش على

الشعاب المرجانية. كما يمكن أن تصبح كثافةُ الصيد على الجبال البحرية عاليةً للغاية، حيث تُجر عادةً مئات إلى آلاف الشِّباك في منطقة الجبل البحري الواحدة. بذلك يمكن حصدُ عشرات الأطنان من المرجان في شبكة واحدة، وفي أحد المصايد الجديدة في الجبال البحرية قُدِّر أن ما يقرُب من ثلث إجمالي ما تصطاده الشِّباك هو من الصيد العرضي المرجاني. وقد أظهرَت بوضوحٍ المقارناتُ بين الجبال البحرية «المَصِيدة» و«غير المَصِيدة» مدى الضرر الذي لحِق بالموائل وفقدانها للتنوُّع في الأنواع الناتج عن الصيد بشباك الجر، مع تحوُّل موائل المرجان الكثيفة إلى أنقاضٍ في معظم المناطق التي فُحِصَت.

لسوء الحظ، توجد معظم الجبال البحرية في مناطق خارج الحدود الوطنية، الأمر الذي يجعل من الصعب للغاية تنظيمَ أنشطة الصيد بها، لكن بعض الجهود جاريةٌ لإنشاء معاهدات دولية تهدف إلى تحسين إدارة النظم البيئية للجبال البحرية وحمايتها. ليس مستغرَبًا أن تصبح المصايد القائمة على الجبال البحرية مثارًا للجدل. وتُشكِّل مصايد السمك الخشن البرتقالي النيوزيلندية مثالًا جيدًا على تاريخ مصايد الأسماك في الجبال البحرية وعلى الآراء الحاليَّة بشأن استدامتها. فقد بدأت هذه المصايدُ في أواخر السبعينيَّات وتوسعَت بسرعةٍ كبيرة، وبحلول الثمانينيات بلغ المصيدُ السنوي في ذروته نحو ٥٤ ألف طن. في ذلك الوقت، كان واضحًا أن مخزون السمك الخشن البرتقالي كان أقلَّ بكثير في إنتاجيته مما كان يُظن، وأنه قد تعرَّض للصيد الجائر المُفرِط. فانخفض إجماليُّ المصيد المسموح به إلى ٢٥ ألف طن بحلول منتصف التسعينيَّات، وإلى نحو ١٧ ألف طن بحلول عام ٢٠٠٠، كما أُغلق العديد من أماكن المخزون أمام الصيد. وحظر العديدُ من كبار بائعي المواد الغذائية بالتجزئة السمكَ الخشن البرتقالي من أرففهم وانهارت مصايد الأسماك تمامًا. ومن ثَم طوَّرت حكومة نيوزيلندا جنبًا إلى جنب مع العاملين في صناعة الصيد طرقًا لتقدير إنتاجية السمك الخشن البرتقالي، وبدأت بعض مخزونات الأسماك في إعادة التكوُّن منذ ذلك الحين. يبلغ المصيد السنوي الآن نحو ٧٠٠٠ طن وقد تحوَّل التركيز إلى «صيدٍ أقلَّ ومكسبٍ أكثرَ». في عام ٢٠١٦، نال ثلاثة مخزونات للسمك الخشن البرتقالي تصديقَ مجلس الإشراف البحري ومقره لندن (MSC) باعتبارها مخزونات مستدامة استنادًا إلى أحجامها، وأثر المصايد على النظام البيئي البحري الأوسع، وجودة إدارة المصايد. ونحو ثلثي إجمالي مصايد الأسماك الآن قيدُ التصديق. كان أحد الشروط لذلك يتمثَّل في أن سفن الصيد يجب أن تعود إلى مواقع جرِّ الشِّباك نفسها كلَّ عام؛ للحد من تدمير المرجان في الجبال البحرية، ويجب على العاملين في الصناعة أن يضعوا خُطةً

لزيادة فهم آثار الصيد على الشعاب المرجانية. ولكن لا تتفق كلُّ مجموعات حماية البيئة مع تصديق مجلس الإشراف البحري ومقره لندن، بما في ذلك الصندوق العالمي للطبيعة (WWF) ومنظمة السلام الأخضر (جرينبيس)، بحجة أنه لا يزال من السابق لأوانه أن ننعتَ هذه المصايد بالاستدامة، كما أدرجت هيئةُ فورست أند بيرد النيوزيلندية السمك الخشن البرتقالي تحت خيار «يجب ألا تتناوله» في دليلها لعام ٢٠١٧ لأفضل الأسماك.

الفصل السابع

الحياة في مناطق المد والجزر

تُشكِّل منطقة المد والجزر في المحيط العالمي شريطًا رفيعًا من خط الشاطئ يقع بين علامتي المد والجزر، وتُغمَر بالكامل بمياه البحر في حالة أعلى ارتفاع للمد وتصبح فارغةً تمامًا من المياه في حالة أدنى مستوًى للجزر. تكاد تنحصر الكائنات الشاغلة لمنطقة المد والجزر في الكائنات البحرية التي تكيفَت للعيش في بيئة فيزيائية نالها الإجهاد الشديد، حيث تأثرت بالتعرض للهواء، وبأقصى درجات الحرارة وأدناها، وبالرياح، وبقصف الأمواج. وعلى الرغم من أن هذه المنطقة لا تُمثل سوى جزءٍ صغير من المحيط العالمي، فهي موطنٌ لمجتمع بحري متنوِّع ومثير للاهتمام يمكن للبشر دراسته والاستمتاع به باستمرار؛ نظرًا إلى سهولة الوصول إليه. إنها أيضًا مكان يصطاد فيه الناس الأطعمة البحرية بانتظام، وهي عُرضة لمجموعة كبيرة من التأثيرات البشرية، بما في ذلك الصيد الجائر، وتسرُّب النفط، وأعمال التنمية الساحلية، وآثار أقدام آلاف الزائرين.

المد والجزر

يُمثل المد والجزر المنتظِمان السمةَ الغالبة على تلك المنطقة. القوة الدافعة وراء المد والجزر هي قوة السَّحب التي تبذلها جاذبيةُ القمر والشمس على الكتلة السائلة للمحيط العالمي. ونظرًا إلى كون القمر أقربَ بكثيرٍ إلى الأرض من الشمس، فإن له تأثيرًا أكبر من الشمس في حدوث المد والجزر.

يؤدي القمر إلى انتفاخ مياه المحيطات في جانب الأرض الأقرب إليه. يحدث انتفاخٌ آخر في المحيطات بالجانب الآخر من الأرض وذلك، بعبارةٍ بسيطة؛ لأن الأرض تُسحب أيضًا نحو القمر وبعيدًا عن الماء في هذا الجانب البعيد. تستمر الأرض في الدوران أسفلَ هذين الانتفاخين، ومن ثَم، نظريًّا، فإن أي نقطة على الكوكب ستمر أسفل الانتفاخَين كل

يوم، وهو ما يفسِّر سببَ حدوث المد والجزر على خط الشاطئ مرتين في اليوم عادةً؛ أي بفاصلٍ زمني ١٢ ساعة تقريبًا بين المرة والأخرى.

تُعدِّل جاذبية الشمس من تأثير القمر. فعندما يكون كلٌّ من الأرض والقمر والشمس على خطٍّ مستقيم واحد تقريبًا (كل شهر عند اكتمال القمر وعند ظهور القمر الجديد)، تُضاف قوة سَحب الشمس إلى قوة سَحب القمر؛ ولذلك يكون المدُّ والجزر في ذروته في هذا الوقت، فيما يُعرف بالمد والجزر «الربيعي». وعندما يُشكِّل كلٌّ من الأرض والقمر والشمس زاويةً قائمة تقريبًا (خلال رُبعَي القمر الأول والأخير)، تُنقِص قوة سَحب الشمس من قوة سَحب القمر ويكون المد والجزر في أدنى مستوياته في هذا الوقت، وهو ما يُعرف بالمد والجزر «المَحاقي».

هكذا يؤسِّس القمر والشمس للإيقاع الأساسي للمد والجزر ولارتفاعه على كوكبنا. تُحدِث كتلُ اليابسة القارية تعديلاتٍ جذريةً في هذا الإيقاع والارتفاع، حيث تتداخل تداخلًا واضحًا مع انتفاخات مياه المحيطات، وشكل أحواض المحيطات، وخواص خط الشاطئ في المنطقة. والنتيجة هي أن القمر والشمس يُحدثا نوعًا من تَخَضخُض المحيطات المدِّي الجزري على نطاقِ حوض المحيط، الذي يتغيَّر في مجاله ومنطقته لتكوين أنماط وارتفاعات مختلفة في المد والجزر في الموقع الساحلي الواحد. لذلك، على الرغم من أن معظم المواقع الساحلية تشهد جزرَين ومدَّين يوميًّا بالارتفاع نفسه تقريبًا (وهو ما يُسمى بالمد والجزر نصف النهاري)، تشهد بعض المناطق مدَّين وجزرَين يوميًّا بارتفاعات مختلفة تمامًا (مد وجزر نصف نهاري مختلط)، ويشهد عددٌ قليل من الأماكن مدًّا واحدًا وجزرًا واحدًا فقط خلال اليوم (مد وجزر نهاري).

سُبل تكيُّف الكائنات الحية في مناطق المد والجزر

يُحدِث المد والجزر تأثيراتٍ كبيرةً في حياة الكائنات البحرية في مناطقه، حيث يغمرها المدُّ بانتظام ثم تُصبح عرضةً في أوقاتٍ متفاوتة للهواء، والحرارة، والبرودة، والأمطار، والأمواج في حالة الجزر. طوَّرت الكائنات التي تعيش في مناطق المد والجزر طرقًا مختلفة للتعامل مع مثلِ هذه الصور من الإجهاد. على سبيل المثال، لدى القواقع البحرية الصغيرة، أو أصداف البحر، التي تعيش في منطقة المد والجزر الصخرية في المناطق الاستوائية، طرقٌ مختلفة لتجنُّب ارتفاع درجة الحرارة في حالات الجزر. فلها أصدافٌ فاتحة اللون لتقليل امتصاص الحرارة، وحدبات صغيرة على أصدافها تعمل كأجنحة التبريد في المُبرِّد

(الرادياتور)، وتتشبَّث بالصخور قدرَ الإمكان بخيطٍ مخاطي لتجنب الاحتكاك المباشر بالطبقة السفلى. ويتجنب بلح البحر والبرنقيلات التي تعيش في منطقة المد والجزر الصخرية فقدانَ الماء والتَّجفُّف في حالة الجزر عن طريق إغلاق أصدافها بإحكام، وحبس كميةٍ كافية من الماء بداخلها للبقاء على قيد الحياة حتى حدوث المدِّ التالي. كما تلجأ سرطانات البحر إلى الشقوق أو إلى أسفل الحصائر الرطبة التي تُكوِّنها الأعشاب البحرية، أو تتراجع ببساطةٍ إلى الشاطئ مع انحسار المد. أما الأعشاب البحرية التي تعيش في منطقة المد والجزر، فيمكن لبعضها تحمُّلُ الجفاف الشديد، حيث تفقد ما يصل إلى ٩٠ في المائة من المياه في أنسجتها في حالة الجزر. ويفرز بعضُها الآخر غطاءً مُخاطيًّا هلاميَّ الملمس يساعد على حبس المياه في أنسجتها. فالحيوانات والنباتات التي تعيش في منطقة المد والجزر في المناخات الباردة يجب أن تتكيَّف مع أدنى درجات الحرارة، والتي تصل في بعض الأحيان إلى عشرات الدرجات تحت الصفر، أوقاتًا تصل إلى ساعات أو أيام عند تعرضها للهواء. بعضٌ من هذه الكائنات الحية تُنتج مركَّبات مضادةً للتجمد، تساعد في حماية أنسجتها من التجميد أو في منحها قدرةً فائقة على تحمُّل التجمُّد.

يتعيَّن على كائنات مناطق المد والجزر التي تعيش على خطوط الشواطئ المكشوفة أيضًا أن تتكيَّف مع قُوى السَّحب والتحطيم الناتجة عن الأمواج. فالبرنقيل والمحار البالغان يتكيفان مع هذه القُوى بلصق نفسيهما بشكلٍ دائم في الصخور، بينما يتشبَّث البطلينوس، والقواقع، والخيتونات بإحكامٍ بهياكلِ تعلُّقٍ عضلية شبيهة بالأقدام، ويُثبِّت بلح البحر البالغ نفسه بالصخور بإفراز ألياف قوية شبيهة بالخيوط تُسمى «خيوط بيسال». كما تَستخدم طحالب مناطق المد والجزر مثبتاتٍ لتثبيت أنفسها بسطحٍ صلب، وتتمتَّع بثالوسات مرنة يمكن ثنيُها ولفُّها مع الأمواج دون أن تتضرر.

تقسيم مناطق المد والجزر

من السمات الكلاسيكية لمنطقة المد والجزر، ولا سيما في الشواطئ الصخرية، تقسيمُها الرأسي حيث تتوزَّع الحياة فيها على نطاقات أفقية مميزة، وغالبًا ما يُميَّز بينها بألوانها المختلفة (انظر شكل ٧-١).

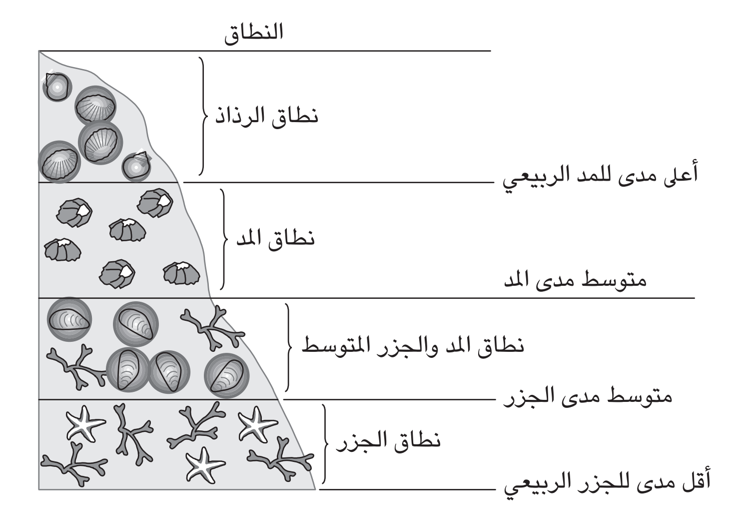
يتشابه النمط الملحوظ للتقسيم الرأسي على الشواطئ الصخرية تمامًا من منطقةٍ إلى أخرى حول الكوكب، مما أدى إلى وضع تصوُّر لـ «نظام عالمي» مقبول بوجه عام لوصف



شكل ٧-١: نمط نموذجي لتقسيم مناطق المد والجزر في حالة الجزر على شاطئ صخري في ولاية واشنطن بالولايات المتحدة الأمريكية.

هذه المناطق. في هذا النظام تُقسَّم منطقة المد والجزر إلى أربعة نطاقات، يمكن الإشارة إليها، من الأعلى إلى الأدنى على الشاطئ، بنطاق الرَّذاذ، ونطاق المد، ونطاق المد والجزر المتوسط، ونطاق الجزر (انظر الشكلين ٧-١ و٧-٢).

يقع نطاق الرذاذ فوق خطٍّ أعلى مدًى للمدِّ الربيعي ويتمثل اتصاله المباشر الوحيد بالبيئة البحرية في الرذاذ المتناثر من الأمواج. وهو جزءٌ من الشاطئ تقلُّ فيه كثافة الكائنات الآهلة له؛ لأن عددًا قليلًا فقط من الكائنات الحية يمكنه الصمود أمام ظروفه القاسية للغاية. لا يُغمر نطاق المد بالكامل بالمياه سوى خلال المد الربيعي، مع تعرُّض



شكل ٧-٢: تقسيم مناطق المد والجزر الصخرية إلى أربعة نطاقات «عالمية».

أجزاء منه للهواء من أيامٍ إلى أسابيع، ومن ثَم يمثل بيئةً قاسية للغاية أيضًا. أما عن نطاق المد والجزر المتوسط، فهي المساحة من الشاطئ بين مستويات المد المتوسط والجزر المتوسط؛ ولذلك تُغمر معظم أجزائه بالمياه أوقاتًا طويلة خلال معظم دورات المد والجزر. يغطي هذا النطاق بكثافة مجموعةً متنوعة من النباتات والحيوانات البحرية. يتمثل نطاق الجزر في المساحة الواقعة بين مستوَى متوسطِ مدى الجزر وأدنى مستوًى للجزر الربيعي. وبذلك يظل مغمورًا بالكامل بالمياه خلال معظم دورات المد والجزر وهو أقلُّ أجزاء منطقة المد والجزر عرضةً للإجهاد.

على الشواطئ في مناطق المد والجزر الصخرية في المناطق المعتدلة تستعمر نطاقَ الرذاذ رُقعٌ من الأشنات ذات اللون البرتقالي الفاتح والرمادي، والبكتيريا الخضراء المزرقَّة التي تُشكِّل طبقةً سوداء رقيقة على الصخور، والطحالب الخضراء الشبيهة بالشعر. كما تنتشر في نطاق الرذاذ أصدافُ البحر والبطلينوس التي تقتات على البكتيريا والطحالب، وكذلك متساويات الأرجل التي تنبش في المواد العضوية الميتة. بالنسبة إلى هذه الحيوانات، يُعد نطاق الرذاذ مَلاذًا من سرطانات البحر والقواقع المفترسة التي لا تستطيع المخاطرة بالبقاء أوقاتًا طويلة في هذه البيئة القاسية.

تهيمن على نطاق المد البرنقيلاتُ التي غالبًا ما تتجمع بكثافةٍ بحيث تُكوِّن شريطًا مميزًا أبيض اللون على الشاطئ. تمر البرنقيلات بطَورٍ تكون فيه على هيئة يرقات صغيرة تشبه الجمبري، يُسمى السيبرد، حيث تنجرف وتسبح بحُرية في المحيط. عندما تجد اليرقة مكانًا مناسبًا لتستقرَّ فيه في منطقة المد والجزر، تُفرِز غِراءً من غدةٍ في رأسها وتُثبِّت نفسها على سطحٍ صلب. ثم تُفرِز مأوًى جيريًّا يشبه الصندوق حول نفسها مغطًّى بزوجين من الألواح التي يمكن فتحها وغلقها كالباب المسحور. عندما تكون الألواح مفتوحةً في حالة المد، يمد البرنقيل مجموعةً من الأرجل الريشية التي تُرشِّح العوالق من مياه البحر. وفي حالة الجزر تكون الألواح مغلقةً لحماية الحيوان بداخلها من المفترسات ومن التجفُّف.

يشغل نطاق المد والجزر المتوسط بكثافةٍ بلح البحر، الذي عادةً ما يُكوِّن شريطًا أسودَ مميزًا على الشاطئ. وكالبرنقيلات، يتكاثر بلح البحر أيضًا إلى يرقات صغيرة مستقلة العيش، تُسمى باليرقات حاملة الغشاء، تتفرَّق مدةً في المحيط ثم تبحث عن مكانٍ مناسب للاستقرار في منطقة المد والجزر. عندما تعثر يرقة بلح البحر على بقعةٍ جيدة، تُثبِّت نفسها بالصخور عن طريق إفراز خيوط بيسال من غدة في قدمها، ثم تنمو وتتحول إلى الشكل المألوف لبلح البحر البالغ ذي الصدفتَين. ويُرشِّح بلح البحر البالغ العوالق من مياه البحر عندما تنغمر به، أما في حالة انحسار المياه فيغلق صدفاته بإحكام لتجنُّب الجفاف والمفترسات الرحالة مثل نجوم البحر. كما يشغل نطاق المد والجزر المتوسط أيضًا المحار، والبطلينوس، وأصداف البحر وأنواعًا مختلفة من الأعشاب البحرية اللحمية البنية اللون التي توفر مأوًى رطبًا لنجوم البحر وقنافذ البحر وغيرها من الحيوانات البحرية في حالة الجزر.

تَشغل نطاقَ الجزر بكثافة مجموعةٌ من الأعشاب البحرية والحيوانات التي يمكنها تحمُّل التعرُّض العرضي للهواء. ففيها تنتشر الأعشاب البحرية الحمراء، والخضراء، والبنية، جنبًا إلى جنب مع أنواع كثيرة من الحيوانات البحرية بما في ذلك شقائق النعمان، ونجوم البحر، وقنافذ البحر، والنجوم الهشة، وخيار البحر، وسرطان البحر، والقواقع، وبزاقات البحر، والديدان.

على شواطئ المد والجزر الصخرية في المناطق المدارية، تُكوِّن أنواعٌ مختلفة من البكتيريا والطحالب أغشيةً رمادية وسوداء اللون على الصخور في نطاق الرذاذ. في هذا النطاق، تتغذى مجموعةٌ متنوعة من أصداف البحر على هذه الأغشية. عادةً ما تُضفي

الطحالبُ الثاقبة للصخور على نطاق المد لونًا أصفر. وقد توجد البرنقيلات، والبطلينوس، والقواقع في نطاق المد، ولكنها تكون عادةً بأعداد صغيرة مقارنةً بأعدادها في الشواطئ الصخرية المعتدلة. كما توجد في الغالب منطقة وردية في نطاق المد والجزر المتوسط تُكوِّنها الطحالبُ المرجانية المكوِّنة للقشور. وتحتلُّ أنواعًا مختلفة من القواقع هذا النطاق إلى جانب بلح البحر، وشقائق النعمان البحرية، والبطلينوس، والبرنقيلات. غالبًا ما تُغطي الأعشاب البحرية البنية الصخور في نطاق الجزر الذي يُعد موطنًا لمجموعة متنوعة من الكائنات البحرية مثل قنافذ البحر، وشقائق النعمان البحرية، والبطلينوس، وخيار البحر، والإسفنج.

أُسس تقسيم مناطق المد والجزر

على مدى عقودٍ عديدة، سعى علماء الأحياء البحرية لفهم العوامل التي تُكوِّن الأنماط المميزة للتقسيم الرأسي على شواطئ المد والجزر الصخرية. ومن المعروف الآن أن منطقة المد والجزر قد تكوَّنَت نتيجةَ تأثيرٍ متبادل معقَّد للعوامل البيولوجية والفيزيائية. بشكلٍ عام، فإن قدرة العشب البحري أو الحيوان على تحمُّل العوامل الفيزيائية، مثل التعرض للهواء والحرارة والبرودة والجفاف وقُوى الأمواج، هي ما يُحدد نطاق منطقة المد والجزر الذي يمكن للعشب أو الحيوان العيش فيه. أما العوامل البيولوجية، مثل المنافسة والرعي والافتراس وأنماط استيطان اليرقات، فتؤثِّر في العوامل الفيزيائية وتتأثَّر بها وتُغيِّر فيها وتُحدد في النهاية أماكنَ عيش الكائنات الحية على الشاطئ.

يُمثل التأثير البيولوجي المتبادل بين البرنقيلات، وبلح البحر، ونجوم البحر، والأعشاب البحرية على الشاطئ الصخري المعتدل مثالًا جيدًا على آليَّة سريان هذا الأمر. لمكان المعيشة أهميةٌ كبرى في منطقة المد والجزر، مما يجعل التنافس عليه أحد العوامل المهمة التي تؤثِّر على التوزيع الفعلي لبعض الأنواع على الشاطئ. لدى البرنقيلات القدرةُ على الاستقرار والعيش في أي مكان في نطاق المد والجزر المتوسط ونطاق المد على الشواطئ الصخرية المعتدلة بسبب قدرتها على تحمُّل عوامل الإجهاد الفيزيائية. ولكنها عادةً ما تُستبعد من معظم أجزاء نطاق المد والجزر المتوسط الأكثر اعتدالًا حيث تكون أقلَّ عرضةً للإجهاد، ولديها وقتٌ أطول للتغذية، وتنمو أسرع. ذلك لأن بلح البحر يتفوق على البرنقيل في نطاق المد والجزر المتوسط. يتمكَّن بلح البحر من ذلك بفضل نموِّه الزائد وخنقه للبرنقيلات.

وهكذا، تستمر البرنقيلات في نهاية المطاف في اللجوء في الأساس لنطاق المد حيث لا يستطيع بلح البحر تحمُّل البيئة القاسية.

إلا أن البرنقيلات لا تُستبعد تمامًا من نطاق المد والجزر المتوسط وتظل به على هيئة بقع. هذا نتيجة شكل آخر من أشكال التأثير البيولوجي المتبادل، وهو الافتراس. ففي نطاق المد والجزر المتوسط، من شأن نجوم البحر افتراسُ بلح البحر، ومن ثَم يَحول ذلك بينه وبين هيمنته الكاملة على هذا النطاق. إلا أن نجوم البحر لا يمكنها المغامرة بدخول نطاق المد والجزر المتوسط لتناول بلح البحر إلا لأوقاتٍ محدودة في حالة المد، ومن ثَم يحول ذلك بينها وبين الإفراط في تناول بلح البحر. ولكن في نطاق الجزر، يمكن لنجوم البحر أن تفترسَ بلح البحر في أغلب الأوقات كما تشاء، وبذلك يمكنها القضاء على بلح البحر في هذا النطاق تمامًا.

لذلك، ففي هذا الوضع، يتحدَّد الحدُّ الأعلى لتوزيع البرنقيلات بالعوامل الفيزيائية والحد الأدنى منه بعامل بيولوجي، وهو منافسة بلح البحر على المكان، وبالمثل، يُحدد الحد الأعلى لتوزيع بلح البحر بالعوامل الفيزيائية والحد الأدنى بعامل بيولوجي، وهو في هذه الحالة افتراس نجوم البحر. كلما دُرسَت منطقة المد والجزر الصخرية عن كثَب، زاد انكشاف حجم التعقيد في أشكال التأثير البيولوجي المتبادل. على سبيل المثال، تتنافس الأعشاب البحرية البُنية أيضًا على مكان المعيشة في نطاق المد والجزر المتوسط، وإذا استقرَّت تمامًا في مكانٍ ما، يمكنها الحفاظ عليه بمنع يرقات بلح البحر والبرنقيل من الاستقرار هناك. يبدو أن هذا نتيجة انجراف شفرات أعشاب البحر ذهابًا وإيابًا عبر السطح الصخري بفعل حركة الأمواج ومنع يرقات بلح البحر والبرنقيلات من ضمان التثبُّت. من ناحية أخرى، فإن رعي البطلينوس والقواقع على الأعشاب البحرية من شأنه أن يُقلل من غطاء الأعشاب البحرية، ما يسمح لبلح البحر والبرنقيلات بالتثبُّت. كردِّ فعلٍ لهذا الرعي، يمكن لبعض الأعشاب البحرية إنتاجُ موادَّ كيميائية سامة تعوق الرعي المتزايد.

التأثيرات البشرية

يمكن أن تتعرض منطقة المد والجزر لتأثيرات بشرية خطِرة؛ نظرًا إلى سهولة الوصول إليها وارتباطها الوثيق باليابسة وأعمال التنمية البشرية. فهي تمد البشر بمصدرٍ جاهز من الأطعمة البحرية غير المستزرعة مثل بلح البحر، والمحار، والبطلينوس، وأصداف

البحر، وقنافذ البحر، وسرطان البحر، والحلزون الصدفي، وأذن البحر، وأنواعًا مختلفة من الأعشاب البحرية التي غالبًا ما تُحصد على سبيل الترفيه وعلى أساسٍ يفتقر إلى التنظيم بدرجة كبيرة. في بعض الأماكن القريبة من المناطق المأهولة بالسكان، تُحصد مثل هذه الكائنات الحية بشكلٍ مفرط وهي الآن نادرةٌ أو غائبة عن منطقة المد والجزر التي كانت تتمتع بوفرة فيها. يمكن لمثلِ هذا الحصاد أيضًا أن يُلحِق تغييراتٍ جوهريةً في بِنية مجتمعات منطقة المد والجزر. من الأمثلة الجيدة على ذلك حصادُ قواقع منطقة المد والجزر المفترسة الكبيرة على يد السكان المحليين في تشيلي. ففي المناطق التي تُحصد فيها هذه القواقع، يُهيمن على نطاق المد والجزر المتوسط استزراعٌ أحاديٌّ لبلح البحر، ولكن في حالة منع مثل هذا النوع من الحصاد، يعيش في نطاق المد والجزر المتوسط البرنقيلات والأعشاب البحرية، وكذلك بلح البحر، ويتمتع النطاق بتنوُّع أعلى إجمالًا في الأنواع. هذا لأن القواقع تأكل بلح البحر ومن ثَم تمنع بلح البحر من التفوق على الأنواع الأخرى في السيطرة على المكان.

في بعض الدوائر القضائية حول العالم، وضِعَت خطوات من أجل إدارةٍ أكثرَ عناية للآثار الناجمة عن الحصاد الترفيهي في منطقة المد والجزر عن طريق فرض حصص للحصاد الترفيهي أو عن طريق إنشاء محميات بحرية «محظورة» حيث لا يُسمح بالحصاد بأي شكل من الأشكال.

تتعرَّض الكائنات في المنطقة أيضًا للحصاد التجاري على نطاق واسع. على سبيل المثال، يُحصد نوع يتميز بوفرته من الأعشاب البحرية البنية، والمعروفة باسم «العُشب الصخري»، تجاريًّا من مناطق المد والجزر في شرق كندا وولاية ماين. تُجفَّف الأعشاب البحرية وتُستخدم في صناعة السماد العضوي، وعلف الحيوانات، والمكملات الغذائية، وفي استخراج الألجينات التي لها عدة استخدامات، ومنها كمادة مضافة للآيس كريم ومنتجات الألبان الأخرى. كما يُحصد أيضًا بلح البحر غير المستزرع للأغراض التجارية قبالة سواحل ولاية ماين، بينما يُحصد المحار تجاريًّا في مناطق المد والجزر بجنوب أفريقيا وأماكن أخرى حول العالم.

ومجرد أبسط الأفعال من السير فوق الصخور وقلبها في منطقة المد والجزر إلى مشاهدة الكائنات الحية تحتها من شأنها أن تكون مدمِّرة لتلك البيئة. لا يُشكل هذا مشكلةً في السواحل المعزولة، ولكن الشواطئ الصخرية القريبة من المراكز الحضرية تجذب أعدادًا هائلة من الزائرين ويمكن أن تتأثَّر بشدة. لتوضيح الصورة، تجذب بعض مواقع مناطق المد والجزر الصخرية «المُستهلَكة» على طول ساحل كاليفورنيا ٢٥ ألف

إلى ٥٠ ألف زائر سنويًّا لكل ١٠٠ متر من خط الشاطئ. ولا تزال المواقع الأقل شعبية تستقبل من ٢٠٠٠ إلى ١٠ آلاف زائر في السنة لكل ١٠٠ متر من خط الشاطئ. يؤدي وطءُ أقدام كل هؤلاء الزائرين الذين يسيرون في منطقة المد والجزر على نطاق الجزر؛ إلى إزاحة الأعشاب البحرية والحيوانات وتحطيمها. كما يتسبَّب العديد من الزائرين أيضًا في انقلاب الصخور، مما يؤدي إلى تحطيم الكائنات الحية التي تعيش على قممها وتعريض الكائنات الحية التي تعيش تحت الصخور إلى الجفاف، وحركة الأمواج، والافتراس. يؤدي هذا إلى وجود صخورٍ بأطراف من الكائنات التي تعيش حول حوافها فقط ولا يعيش أيٌّ منها في الأسطح العلوية أو السفلية للصخور. وحتى في المحميات البحرية المحظورة، يمكن للناس السير بحريةٍ في منطقة المد والجزر؛ ومن ثَم يستمر هذا الشكل من أشكال التأثير. لذلك، إن كانت هناك رغبة في توفير حماية كاملة لبعض مناطق المد والجزر المُستهلَكة، فمن الضروري تثقيفُ العامة حول التأثيرات التي يمكن أن يتسببوا فيها، وفي بعض الحالات، الحد من عدد الزائرين، أو الإبقاء عليهم في «مسارات» من مناطق المد والجزر، أو تقييد الوصول إلى بعض المواقع تمامًا.

في حضارتنا القائمة على الوقود الأحفوري، يُشكل التلوث النفطي تهديدًا لمجتمعات المد والجزر في أي مكان على هذا الكوكب، كما يتضح في تكوُّن كرات القطران الواسعة الانتشار — كرات النفط الخام — التي يُعثر عليها وقد انجرفت على الشواطئ. تصل كرات النفط الخام إلى المحيط من أربعة مصادر رئيسية: التسربات الطبيعية، وعمليات الاستخراج، والنقل، والاستهلاك. وفقًا للبيانات التي نشرها المجلس القومي الأمريكي للبحوث التابع للأكاديمية الوطنية للعلوم في عام ٢٠٠٣، فإن تقسيم هذه المصادر هو على النحو التالي تقريبًا:

يتسرب نحو ٦٠٠ ألف طن من النفط الخام طبيعيًّا إلى البيئة البحرية كل عام من التكوينات الجيولوجية المحتوية على النفط أسفل قاع المحيط. يمثِّل هذا ما يقرُب من نصف كل كمية النفط الخام الذي يدخل إلى المحيطات. وتُطلق هذه الكمية الكبيرة من النفط الخام بمعدَّلٍ بطيء، ومن عدة مواقع مختلفة، لا تتضرر معه البيئة البحرية بأكملها.

أما الأنشطة البشرية المرتبطة بالتنقيب عن النفط وإنتاجه، فتؤدي إلى إطلاق في المتوسط ما يُقدر بنحو ٣٨ ألف طن من النفط الخام في المحيطات كل عام، وهو ما يمثل نحو ٦ في المائة من إجمالي النفط الداخل إلى المحيطات نتيجةَ النشاط البشري في

جميع أنحاء العالم. على الرغم من صِغر حجم هذا التسرُّب مقارنةً بالتسرب الطبيعي، يمكن للنفط الخام من هذا المصدر أن يتسبَّب في أضرار جسيمة للنظام البيئي الساحلي نظرًا إلى إطلاقه بالقرب من السواحل، وأحيانًا بكميات كبيرة جدًّا ومركزة. في الحقيقة، تُعد كارثة تسرُّب النفط في خليج المكسيك عام ٢٠١٠ أكبرَ حادث لتسرُّب النفط في البيئة البحرية في التاريخ. في هذه الحادثة، غرقَت منصةٌ لحفر آبار النفط في أعماق المحيط على بُعد نحو ٦٦ كيلومترًا من الساحل في مساحةِ مياه تُقدَّر بنحو ١٥٠٠ متر، مما سمح بتدفُّق كمياتٍ هائلة من النفط الخام من خزانٍ تحت أرضية المحيط. خلال مدةِ ثلاثة أشهر، تسرَّب نحوُ ٦٧٠ ألف طن من النفط إلى خليج المكسيك قبل تحديد موقع التدفُّق تحت الماء في النهاية. وتلوث نحو ٧٩٠ كيلومترًا من الخط الساحلي بالنفط الذي تسبب في تغطيةِ وخنقِ وتسمُّم الحياة البحرية في منطقة المد والجزر وما تحتها، وكذلك الحياة البرية الساحلية. كما أدَّى إلى إغلاق مصايد الجمبري في كثيرٍ من أنحاء الخليج. بالإضافة إلى ذلك، تسبَّبَت المشتتات الكيميائية والأجهزة الميكانيكية المستخدَمة في مرحلة التنظيف في مزيدٍ من الضرر للحياة البحرية.

نتج عن نقل النفط والمنتجات النفطية حول العالم في ناقلات إطلاق نحو ١٥٠ ألف طن من النفط في جميع أنحاء العالم كل عام في المتوسط؛ أي نحو ٢٢ في المائة من إجمالي ما يدخل من النفط إلى المحيطات نتيجةَ النشاط البشري. يمكن للانسكابات النفطية من الناقلات أن تكون كبيرةً ومركَّزة بدرجة كارثية، ومن ثَم شديدة الضرر. عندما رسَت الناقلة إكسون فالديز على الصخور قبالة سواحل ألاسكا في عام ١٩٨٩، تسرَّب نحوُ ٣٧ ألف طن من النفط إلى لسان برينس وليام البحري. حملت التيارات بقعة الزيت أسفل سواحل ألاسكا، حيث غطَّت نحو ٢١٠٠ كيلومتر من خط الساحل، وألحقَت أضرارًا جسيمة بمنطقة المد والجزر وتسبَّبت في نفوق مئات الآلاف من الطيور البحرية، وآلاف الثدييات البحرية، وعددٍ غير محدَّد من الأسماك، كما أُغلقت مصايد السلمون، والرنجة، وسرطان البحر، والجمبري، والسمك الصخري، وسمك السمور. تظل آثار هذه الكارثة باقيةً حتى يومنا ولا تزال أجزاء من خط الشاطئ ملوَّثة بالنفط أسفل سطح المياه مباشرة. من المشجِّع أن عدد انسكابات الناقلات الكبيرة (الذي تزيد على ٧٠٠ طن)، ومن ثَم إجمالي كمية النفط التي تدخل إلى البيئة البحرية من هذا المصدر، قد انخفضت بشكل ملحوظ خلال العقود الثلاثة الماضية، وذلك من متوسط ٧٫٧ انسكابات سنويًّا بين عامي ١٩٩٠ و١٩٩٩ إلى ٣٫٢ بين عامَي ٢٠٠٠ و٢٠٠٩ وإلى ١٫٨ بين عامي ٢٠١٠ و٢٠١٧.

يدفق نحوُ ٤٨٠ ألف طن من النفط إلى البيئة البحرية كلَّ عام في جميع أنحاء العالم من التسرُّب المرتبط باستهلاك المنتجات المشتقة من النفط في السيارات، والشاحنات، وبدرجةٍ أقل في القوارب. يتجمع فقدُ النفط من تشغيل السيارات والشاحنات في المناطق الحضرية المرصوفة من مكان انجرافه في الجداول والأنهار، ومنها إلى المحيطات. المثير للدهشة أن هذا يُمثل أهمَّ مصدر للتلوث النفطي الناتج عن الأنشطة البشرية في البيئة البحرية، وهو نحو ٧٢ في المائة من إجمالي التلوث بالنفط. ونظرًا إلى أنه مصدرٌ واسع الانتشار من مصادر التلوث؛ فهو يُعد الأصعبَ في السيطرة عليه. لهذا التلوث بالنفط المستمر والواسع الانتشار تأثيرٌ خبيث على الكائنات البحرية وعلى عمليات المجتمعات البحرية. ومن المعروف أن للعديد من أنواع الهيدروكربونات العضوية الموجودة في النفط آثارًا ضارةً وتراكمية على العديد من الكائنات البحرية، حتى في حالة التركيزات المنخفضة للغاية، ولا سيما على الحيوانات البحرية في مرحلة اليرقات.

الفصل الثامن

طعام المحيطات

لا يزال البشر يحصدون الطعام من المحيطات منذ آلاف السنين. كادت بداية الأمر تُنبئ بأنه سيكون صيدًا على نطاق صغير لكسب العيش الكفاف في المياه الساحلية، إلا أنه مع المزيد من الخبرة وزيادة عدد السكان تطوَّر إلى مشروعٍ تجاري واسع النطاق. فالآن يجري الصيد في المحيطات في جميع أنحاء العالم على نطاقٍ صناعي ويُزوِّد البشر بآخرِ أهم مصادر الأغذية غير المستزرعة. تجوب اليوم المحيطاتِ أكثرُ من ٤,٦ ملايين سفينة صيد، ونحو ٢,٨ مليون منها مزوَّدة بمحركات، كما يعمل أكثر من ٤٠ مليون شخص في قطاع الصيد البحري الأوَّلي. تتجاوز قيمة تفريغ حمولات الأطعمة البحرية غير المستزرعة ١٣٠ مليار دولار أمريكي سنويًّا وتمثل الأطعمة البحرية عنصرًا مطلوبًا في النظام الغذائي لملياراتٍ عديدة من الناس في جميع أنحاء العالم، حيث يُزودهم بمصدرٍ عالي الجودة من البروتين. ولكن من المؤسف أن المصيد العالمي للأطعمة البحرية قد بلغ ذروته في منتصف تسعينيَّات القرن العشرين وهو الآن في حالةٍ من الركود أو التراجع، كما يتعرض ثلث مخزون الأسماك بالكامل للصيد الجائر ويواجه انهيارًا في كميته. للصيد الجائر أثرٌ شديد الخطورة ليس فقط على الأنواع المستهدفة، ولكن أيضًا على التنوُّع البيولوجي وعلى آليات عمل العديد من الأنظمة البيئية البحرية.

التوسُّع في حصاد الأطعمة البحرية عبر التاريخ

غالبًا ما يُفترَض أن أعداد المصيد من الأطعمة البحرية كانت محدودةً في العصور القديمة بسبب انخفاض أعداد السكان وبساطة مُعدات الصيد والسفن المتاحة، وأن مخزون الأطعمة البحرية لم يكن ليُستهلك إلا بالقدْر الضئيل حتى عهدٍ قريب. ولكن على العكس

من ذلك، فقد استُنتِج من الدراسات التاريخية للبيئية البحرية أن البشر كانت لهم تأثيراتٌ كبيرة على الموارد البحرية آلافَ السنين. يشكِّل البحر الأبيض المتوسط مثالًا جيدًا على الضغط البشري الطويل الأمد على الموارد البحرية.

سكن البشر شواطئ البحر الأبيض المتوسط على نحوٍ مستدام قرابة ٥٠ ألف سنة. وقد وُجِدت مجتمعات الصيد هناك منذ ١٠ آلاف عام على أقل تقدير، ولطالما كانت الأطعمة البحرية مصدرًا مهمًّا للبروتين لدى شعوب البحر الأبيض المتوسط منذ العصرَين الإغريقي والروماني على أقل تقدير، بدايةً من نحو ٩٠٠ سنة قبل الميلاد. شملت الأنواع المصيدة الدلافين، والسلاحف البحرية، وأسماك القرش، والشِّفنِينِيَّات، والتونة، والسردين، والبَلَم، والبوري، والهامور، والسمك المفلطح، والمحار، وبلح البحر، والحلزون الصدفي، والأسقلوب. استُنفِدَ بعضٌ من هذه الأنواع في العصر الروماني وبحلول القرن الأول الميلادي كانت المياهُ الساحلية حول إيطاليا قد طالها الصيدُ الجائر إلى حدٍّ كبير وانتشر الحصاد في الجزر البحرية مثل صقلية وكورسيكا. وقد أدَّى انهيار الإمبراطورية الرومانية على الأرجح إلى تخفيف بعض الضغط على الموارد البحرية، إلا أن استئناف النمو السكاني بأعداد هائلة في القرن الخامس عشر قد أدَّى إلى استنفاد الموارد البحرية في المناطق الساحلية مجددًا. في أواخر القرن التاسع عشر، شهدت قدراتُ الصيد تطورًا كبيرًا في منطقة البحر الأبيض المتوسط مع زيادة أعداد السكان أضعافًا مضاعفة. وخلال أوائل القرن العشرين ومنتصفه، مُدَّت أساطيل الصيد بالمحركات وتوسَّع الصيد الصناعي في جميع المياه الساحلية للبحر الأبيض المتوسط. الآن، وبعد ١٠٠ عام من ضغوط الصيد المكثفة، انخفضت تقريبًا جميع أنواع الطعام البحرية التقليدية في البحر الأبيض المتوسط إلى أقل من ٥٠ في المائة من كمية وفرتها الأصلية، وأصبح نحوُ ثلث الأنواع الآن شديد النُّدرة عِلاوةً على انقراض العديد من الأنواع وظيفيًّا. ظهر التأثير الأكبر في المفترسات العليا، التي كانت أول ما استهدفه الصيادون.

بدأ الاستغلال المكثَّف للموارد البحرية في أجزاءٍ أخرى من أوروبا في وقتٍ متأخر كثيرًا عما كان في البحر الأبيض المتوسط. ولكن بحلول القرن الثامن أو التاسع تقريبًا، كان الفايكنج يستهلكون مخزونًا كبيرًا من سمك القد، والحدوق، والبولوق، والرنجة، وغيرها من الأنواع التي ازدهرَت في بحار شمال أوروبا في هذا الوقت. وقد جلبوا هذه المهارة معهم عندما انتشروا في بريطانيا ونورماندي، حيث أصبح الصيد البحري رائجًا في القرن الحادي عشر. بحلول نهاية القرن الثامن عشر، شهد العديد من مخزونات الأسماك

في شمال أوروبا حالةً من التدهور من جراء الصيد الجائر، واتُّخذَت أولى الخطوات نحو حماية بعض المخزونات. غير أن الصيد المكثف قد استمر بلا انقطاع وبحلول عام ٢٠٠٠ كان أكثرُ من نصف مخزون الأسماك في شمال أوروبا يُعد خاضعًا للاستغلال الخَطِر. تشير التقديرات إلى أن حجم مخزونات الأسماك في أوروبا اليوم، مجتمعةً، ما هو إلا عُشر حجمها في عام ١٩٠٠ (انظر شكل ٨-١). وبالعودة إلى الوقت الذي لم يكن فيه مخزون الأسماك في أوروبا غيرَ مستغَلٍّ، كان من المقترح أن تحويَ بحار أوروبا في الوقت الحاضر أقلَّ من خمسةٍ في المائة من إجماليِّ كتلة الأسماك التي كانت تسبح فيها في الماضي.



شكل ٨-١: مشهدٌ في سوق أسماك جريمسبي بالمملكة المتحدة عام ١٩٠٦. كمية الأسماك وأحجامها استثنائية مقارنةً بالمعايير الحالية.

انتشر استغلال الموارد الغذائية البحرية إلى خارج أوروبا انتشارًا مذهلًا في بداية التاريخ. فمنذ وقتٍ مبكِّر يرجع إلى عام ١٠٠٠ ميلادية، كان الفايكنج يستغلُّون مخزون الأسماك الغني حول أيسلندا وجرينلاند وربما في بحار شمال كندا. وبعد قرابة ٢٠٠ عام، كان صيادو الباسك يحصدون أيضًا مخزونَ الأسماك في شمال المحيط الأطلنطي وربما كانوا يمارسون الصيد قبالة سواحل أمريكا الشمالية قبل رحلة كولومبوس في عام ١٤٩٢. ولكن بحلول أوائل القرن السادس عشر، كان الصيادون الباسكيون،

والفرنسيون، والبرتغاليون يصطادون بانتظامٍ سمك القد من منطقة جراند بانكس الضحلة قبالة ساحل جزيرة نيوفندلاند لبيعه في السوق الأوروبية. بحلول عام ١٦٠٠، كانت تُستخرج أكثر من ١٥٠ حمولة سفينة من سمك القد في السنة من البحار الكندية. كان المصيد يُحفَظ بالتجفيف أو التمليح، وهو الشكل الذي كان يُمكِّن من تخزينه عدة سنوات وتوفير مصدر جاهز للبروتين للأوروبيين. يمثل الاستعمار الدائم لأمريكا الشمالية الذي بدأ في القرن السابع عشر بدايةَ استغلال مخزون الأسماك قبالة الساحل الشرقي للولايات المتحدة، بما في ذلك سمك الحفش، والشاد، والسلمون، والألويف، والمحار. بحلول أوائل القرن التاسع عشر، كانت مخزونات الأسماك في الساحل الشرقي لأمريكا الشمالية تظهر عليها علاماتُ التدهور الخطِر.

في أواخر القرن التاسع عشر وأوائل القرن العشرين، خلق التمدُّد الحضري السريع والنمو السكاني العالمي طلبًا متزايدًا باستمرارٍ على الأطعمة البحرية. ارتبط هذا بالتحسينات في نقل المصيد وحِفظه، مما كان يعني أن مخزون الأسماك البحرية يمكن استغلاله بسهولةٍ أكبر، وإمدادُ الأسواق البعيدة به. وقد زاد الحصاد البحري بمعدَّلٍ غير مسبوق في الحجم والحيز الجغرافي مباشرةً عقب الحرب العالمية الثانية، مع توسعٍ شاسع في أسطول الصيد العالمي والتحسينات التي تحققَت في معدات الصيد وبدء معالجة المصيد على متن السفن. كان هذا بمنزلة بداية التحول الصناعي الواسع النطاق لعملية استخراج الطعام من البحار. زاد الصيد بشكل كبير في المياه الساحلية في معظم أنحاء العالم وبدأت أساطيل الصيد في استغلال الموارد البحرية في المياه العميقة أسفل المنحدرات القارية، وبشباك الجر في مناطق الجبال البحرية، واستهداف أنواع المحيطات المفتوحة مثل التونة، وذلك في جميع المحيطات. بحلول عام ٢٠٠٠، تكثَّف الصيد في جميع المناطق حول العالم تقريبًا وخاصة في آسيا، حيث تُسجل الصين الآن أكبرَ إجمالي في العالم للمصيد البحري على الإطلاق.

من منظور القرن الحادي والعشرين يكاد يكون من المستحيل تصوُّر الوفرة التي كانت عليها الأسماك في المحيطات في الماضي. ولكن روايات المستكشفين والمستوطنين الأوائل، إلى جانب المقالات والصور من الصحف والمجلات القديمة، وإحصائيات مصايد الأسماك في القرن التاسع عشر، والسجلات التاريخية لمسابقات الصيد، ترسم صورةً للوفرة المدهشة في أحجام الأسماك مقارنةً بالوقت الحاضر.

طرق الصيد التجاري وتأثيراتها

أتاح ظهور سفن الصيد المزودة بالمحركات صيدًا فائقَ الكفاءة للأطعمة البحرية باستخدام شِباك الجر. وهي شِباك كبيرة مخروطية الشكل تُقطَر خلف سفينة صيد، رافعةً معها الأسماك والكائنات البحرية الأخرى. يمكن لأفواه شِباك الجر الكبيرة أن تكون بعرض ملعب كرة قدم، وبارتفاع مبنًى من ثلاثة طوابق.

يتضمن الصيد بشباك الجر في قاع المحيط سَحب شِباك الجر على طول أرضية المحيط لصيد الأسماك واللافقاريات القاعية، أو التي تعيش في القاع (انظر شكل ٨-٢(أ)). تُسحَب شِباك الجر في الطبقات الوسطى أو منطقة البحر المفتوح، من القاع لصيد أسراب من الأسماك التي تعيش في عمود الماء. تجوب سفنُ الصيد التجارية المياهَ الضحلة للرفوف القارية، وتصيد الأسماك في المنحدرات القارية وكذلك في الأخاديد العميقة والجبال البحرية حتى أعماقٍ تزيد على ٢٠٠٠ متر (انظر شكل ٨-٢(ب)).

في مناطق الصيد الكثيف، يمكن لسفن الجر القاعية أن تصيد في الأجزاء نفسِها من أرضية المحيط عدة مرات في السنة. يسبِّب مثلُ هذا الصيد المكثَّف بشِباك الجر ضررًا تراكميًّا كبيرًا في أرضية المحيط. فشِباك الجر تكشط وتدمِّر موائل القاع التي تتميز بالثراء والتعقيد، والتي كوَّنَتها على مدى قرونٍ كائناتٌ حية مثل الديدان الأنبوبية، ومرجان المياه الباردة، والمحار. تتضاءل هذه الموائلُ في نهاية المطاف لتصبح امتداداتٍ متشابهة من الأنقاض والرمل. فيلحق بهذه المناطق تغييرٌ دائم ويشغلها مجتمع مختلف وأقلُّ ثراءً إلى حدٍّ بعيد يتكيف مع الاضطرابات المتواترة. يمكن لشِباك الجر القاعية أيضًا أن تَصيد كمياتٍ كبيرةً من أنواع الأسماك واللافقاريات غير المرغوب فيها وغير المستهدفة، والمعروفة بالصيد العرضي، التي غالبًا ما تُلقَى مجددًا في البحار. علاوة على ذلك، يمكنها أيضًا أن تصطاد عن غير عمدٍ السلاحف، والدلافين، والفقمات التي تغرق في الشِّباك. لهذه الأسباب تُعد شِباك الجر القاعية شكلًا بالغَ التدمير من أشكال الصيد، وقد حُظِر استخدامها في مناطقَ واسعة من المحيطات في جميع أنحاء العالم. أما الصيد في منطقة البحر المفتوح بشباك الجر فأقلُّ تدميرًا لأنه لا يتعرض للقاع. ولكن لا تزال مشكلة الصيد العرضي قائمة معه أيضًا.

من طرق الصيد الشائعة الأخرى الصيدُ بالخيوط الطويلة، الذي يكون عن طريق سُفنٍ تجرُّ خيوطًا معلَّقة فيها صناراتٌ مزوَّدة بطُعم. يمكن تعليق أكثر من ٢٠٠٠ صنارة من خيط يبلغ طوله عدة كيلومترات. ويمكن استخدام خيوط الصيد الطويلة لصيد أسماك



(أ)

(ب)

شكل ٨-٢: الصيد بشِباك الجر في قاع البحار: (أ) شبكة جرٍّ تُسحَب على طول أرضية المحيط، (ب) صيادون يُفرغون شبكة جرٍّ مليئةً بالسمك الخشن البرتقالي.

منطقة البحر المفتوح أو أسماك القاع، حسب الأنواع المستهدفة. تؤدي طريقة الصيد هذه إلى اصطيادِ أنواعٍ غير مستهدفة من الأسماك، وكذلك الثدييات البحرية، والسلاحف، والطيور البحرية. يمكن الحدُّ من هذه المشكلات باستخدام خيوط الصيد الطويلة ليلًا لتجنُّب اصطياد الطيور البحرية التي تعتمد في صيدها للأسماك على الرؤية أثناء النهار، باستخدام خيوط طويلة ذات ثُقل لتغطس في الماء سريعًا، واستخدام صنارات خاصة لا تصطاد الأنواع غير المستهدفة بسهولة.

تُستخدَم الشِّباك الجرافة المحوطة في المحيط المفتوح لصيد أسماك مثل التونة، والسردين، والسلمون، والماكريل. في هذه الطريقة، تُحاط أسراب الأسماك بستارةٍ عمودية من الشباك، يُسحب قاعها وينضم بعضُه إلى بعض ليحوط الأسماك. لا تؤثِّر الشباك الجرافة المحوطة على قاع المحيط، إلا أن من شأنها التقاطَ الأنواع غير المستهدفة، والأسماك الصغيرة، والثدييات البحرية، مثل الدلافين.

أما الصيد بالشِّباك الخيشومية فيكون بإدلاء ستارةٍ من الشِّباك لإيقاع الأسماك بها. لا يوجد في هذا النوع من الصيد عادةً مساسٌ بالقاع، ويمكن تعديل حجم الشِّباك للحدِّ من صيد صغار الأسماك. إلا أن الصيد بالشِّباك الخيشومية ينطوي على خطر الصيد العرضي وصيد الأنواع المحميَّة، مثل الدلافين. ولكن يمكن تزويد الشِّباك بجهاز «أزاز» (جهاز يبعث نبضات صوتية) لإبعاد الدلافين.

الأنواع البحرية المستغلَّة تجاريًّا

هناك الآلاف من أنواع الأسماك البحرية، ولكن معظم المصيد العالمي يشمل عددًا قليلًا نسبيًّا من الأنواع التي تنتمي إلى عدة مجموعات رئيسية (انظر شكل ٨-٣). تمثل أسماك الكلوبيويد نسبةً كبيرة من المصيد البحري. وهي أسماك صغيرة تسبح في أسراب وتتغذَّى مباشرةً على العوالق النباتية والعوالق الحيوانية وتشمل الرنجة، والسردين، والبَلَم. كما تُعد القدِّيات مجموعةً مهمة أخرى من الأنواع التجارية. وهي أسماكٌ قاعية تشمل سمك القد، والحدوق، وسمك النازلي، والبولوق، وهي أنواع تعيش في المياه الساحلية لشمال المحيط الهادي وشمال المحيط الأطلنطي. تمثل كذلك الأسماك المفلطحة مثل سمك فلاوندر، والهلبوت، وسمك موسى، والبلايس مجموعةً أخرى مهمة للأنواع التجارية التي تعيش في القاع، والتي توجد موائلها أيضًا في المياه الساحلية. ثم هناك آكلات اللحوم الكبيرة السريعة السباحة في منطقة البحر المفتوح، المتمثلة في سمك الإسقمري، التي تشمل

الماكريل والتونة، وهذه الأخيرة تُعد من أهم مصايد الأسماك في المحيطات المفتوحة. تُشكِّل أسماك القرش مجموعةً أخرى من الأسماك البحرية المستغَلة. هناك أيضًا مصايدُ كبيرة للافقاريات البحرية، بما في ذلك القشريات مثل الكركند، وسرطان البحر، والجمبري؛ وللرخويات مثل الحبار، والمحار والحلزون الصدفي.

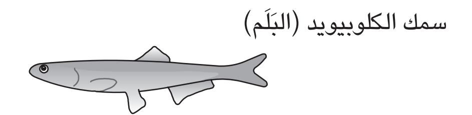
أكبرُ مصايد الأسماك البحرية في العالم هي مصايد البَلَم أو مصايد البَلَم البيروفي («إنجراوليس رينجنز») التي يمكن أن تمثل نحو ثمانية في المائة أو أكثر من المصيد البحري العالمي من الأطعمة البحرية في أي سنةٍ بعينها. أسماك البَلَم هي أسماك صغيرة (يصل طولها إلى نحو ٢٠سم) سريعة النمو، وتتغذى بالترشيح على العوالق النباتية والعوالق الحيوانية في مناطق التيارات الصاعدة الغنية بالمغذيات قبالةَ سواحل بيرو. وتميل للتجمع في أسرابٍ كبيرة وكثيفة الأعداد، مما يُمكِّن من صيدها بكفاءة وبأعداد كبيرة باستخدام الشِّباك الجرافة المحوطة، وسفن الجرِّ في منطقة البحر المفتوح.

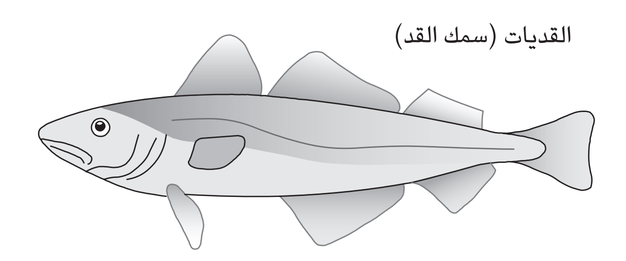
تشهد كميات المصيد من أسماك البَلَم تقلباتٍ واسعةَ النطاق من عامٍ لآخَر. ففي سنوات الوفرة يمكن أن يصل المصيد إلى أكثر من ١١ مليون طن، بينما في السنوات الشحيحة يمكن أن يصل المصيد إلى نحو مليونَي طن، ويمكن أن يصل في السنوات القاحلة إلى ١٥٠ ألف طن. يرجع قدرٌ كبير من هذا التقلب إلى ظاهرة النينيو/التقلبات الجنوبية (ENSO) (انظر الفصل الثاني).

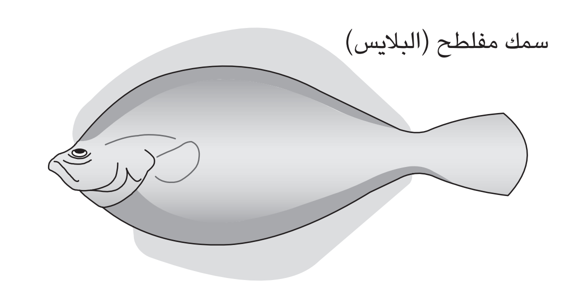
ثاني أكبر مصايد الأسماك في العالم هي مصايد البولوق الألاسكي، وهو نوعٌ من أسماك القاع ينتشر على نطاق واسع في شمال المحيط الهادي. ويُصطاد باستخدام شِباك الجر في منطقة البحر المفتوح التي تلامس القاع أحيانًا ولكن ضررها عليه أقلُّ مقارنةً بضرر شِباك الجر القاعية. يبلغ متوسط المصيد حاليًّا نحو ثلاثة ملايين طن في العام. يُستخدم هذا النوع على نطاقٍ واسع في صناعة الوجبات السريعة. وخلال سنوات ظاهرة النينيو، يمكن أن يَزيد مصيد البولوق الألاسكي على مصيد البَلَم.

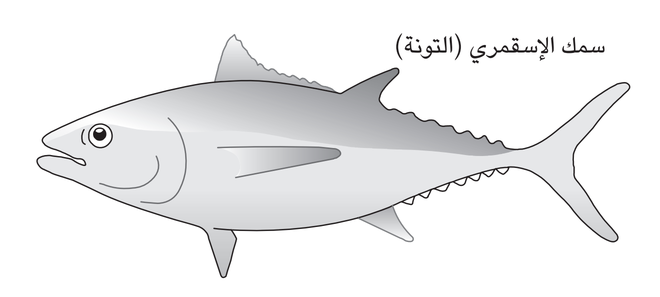
ثالث أكبر المصايد هي مصايد التونة الوثابة، التي تنتشر بوفرةٍ في المناطق الاستوائية للمحيط الأطلنطي، والهادي، والهندي، وهي النوع الرئيسي المُستخدَم في التونة المعلَّبة. غالبًا ما تُصطاد بالشِّباك الجرافة المحوطة، ويبلغ متوسط المصيد نحو ٢٫٦ مليون طن سنويًّا.

لا يحظى البَلَم وبعض الأسماك الزيتية الأخرى باستحسانٍ كبير في الاستهلاك المباشر لدى البشر، ولكن محتواها العالي من الزيوت يجعلها مثاليةً لإنتاج مسحوق السمك وزيت السمك، الذي يُعد كلٌّ منهما من السلع القيِّمة. يُصنع مسحوق السمك









شكل ٨-٣: المجموعات الرئيسية للأنواع البحرية التجارية.

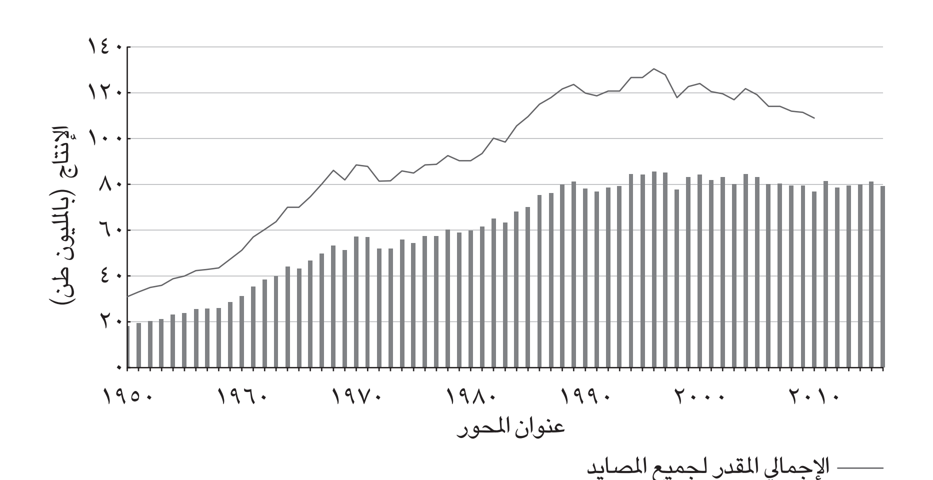
بطهي السمك، وتجفيفه، وطحنه، ويُستخدم مكمِّلًا بروتينيًّا مدمجًا في الأعلاف التجارية للأسماك المستزرعة، والدواجن، والخنازير. أما زيت السمك فيُعصر من السمك المطبوخ ويُستخدم بشكلٍ أساسي في إنتاج الأعلاف للأسماك المستزرعة، ولكنه يوضع أيضًا في كبسولات كمكمل غذائي لصحة الإنسان. يُحوَّل تقريبًا مصيد البَلَم البيروفي بأكمله إلى مسحوق السمك وزيت السمك، ويُمثل نحو ثلث الإنتاج العالمي من هذه المنتجات.

لطالما كان إدخال منتجات الأسماك غير المستزرعة في الأعلاف المستخدَمة في استزراع الأطعمة البحرية؛ مثارًا للجدل الشديد لأن التحليلات أظهرَت وجودَ خَسارةٍ كبيرة في الطاقة الغذائية في هذه العملية، مقارنةً بالأسماك التي نستهلكها مباشرةً. غير أنه ثمَّة تقدمٌ مُحرَز في معالجة هذه المشكلة، وانخفاضٌ في كمية الأسماك التي تُحوَّل إلى مسحوق السمك وزيت السمك. في تسعينيَّات القرن العشرين، كان نحو ثلث المصيد العالمي بأكمله من الأسماك يُحوَّل إلى هذه المكونات بدلًا من أن يستهلكه البشر مباشرةً، ولكن في عام ٢٠١٦ حُوِّل نحو ١٥ مليون طن، أو نحو ١٩ في المائة من المصيد البحري المُسجَّل، إلى مسحوق السمك وزيت السمك. يُنتَج قدرٌ أكبرُ بكثير من هذه المكونات الآن من المنتجات الثانوية للأسماك، مثل فضلاتها وهياكلها، التي غالبًا ما كان يُتخلص منها في الماضي، وتُستخدم بشكل أكثرَ انتقائيةً في أعلاف الأسماك. أظهرت بعض الدراسات الأخيرة أنه في ظل الممارسات الحاليَّة لاستزراع الأسماك البحرية فإن إدخال كيلوجرام واحد من المكونات المستخرجة من الأسماك غير المستزرعة في علف الأسماك يُنتِج في المتوسط نحو كيلوجرامين من الأسماك المستزرعة، مما يعني أنه في تلك الحالة يؤدي استخدامُ المكونات من هذه الأسماك غير المستزرعة إلى إنتاج مزيدٍ من الطعام للبشر. ولكن في حالة استزراع السلمون، على وجه التحديد، فإن هذه النسبة أقلُّ تبشيرًا بنجاح الأمر، نحو ١:١، ولكنها تتحسَّن بمرور الوقت مع اعتماد الممارسات المُحسَّنة.

الاتجاهات في صيد الأطعمة البحرية عالميًّا: تجاوز حد الاستغلال

تحتفظ منظمة الأمم المتحدة للأغذية والزراعة (الفاو) بقاعدة بيانات عالمية لمصايد الأطعمة البحرية ترجع إلى عام ١٩٥٠، تستند إلى المعلومات الرسمية التي تُبلِغ بها الدولَ الأعضاء والاتحاد الأوروبي. تُظهر بياناتُ الفاو أنه في عام ١٩٥٠ بلغ إجمالي المصيد العالمي من الأطعمة البحرية ١٨ مليون طنٍّ متريٍّ من الوزن الطازج. وقد شهد المصيد ازديادًا مطَّردًا وسريعًا منذ ذلك الحين وحتى أواخر ثمانينيات القرن العشرين حيث

بدأ في الاستقرار (انظر شكل ٨-٤). فقد بلغ أعلى مصيد عالمي مسجَّل ٨٦ مليون طن في عام ١٩٩٦. منذ ذلك الحين، انخفض المصيد البحري العالمي إلى دون هذا المستوى، وكان المصيد المُسجَّل في عام ٢٠١٦ هو ٧٩ مليون طن. غير أن هذه البيانات لا تشمل جميع الأطعمة البحرية المصيدة عالميًّا. وذلك لأن التقارير الرسمية للأعضاء غالبًا ما تُهمِل المصيد العرضي الذي كثيرًا ما يُطرح في البحر، وكذلك المصيد من مصايد الأسماك غير القانونية وغير المسجَّلة وغير المنظمة (IUU)، بما في ذلك مصايد الأسماك الحِرفية ومصايد كسب العيش الكفاف، وجميعها يصعب الحصولُ على معلوماتٍ موثوقة عنها. ومن ثَم فإن المصيد الفعلي من الأنواع البحرية غير المستزرعة سيكون أعلى من تقديرات الفاو، غير أن قدْر هذه الزيادة محلُّ جدال. تشير الدراسات الحديثة المستمدة من مجموعةٍ أوسعَ من مصادر البيانات إلى أنه من المرجَّح أن ذروة المصيد العالمي قد بلغت نحو ١٣٠ مليون طن في تسعينيَّات القرن العشرين، وأن هذا المصيد قد انخفض منذ ذلك الحين إلى ما بين ١٠٠ و١٢٠ مليون طن حاليًّا.



شكل ٨-٤: الاتجاهات في الإنتاج العالمي السنوي لمصايد الأسماك البحرية. تشير الأعمدة إلى المصيد المُسجَّل، بينما تشير الخطوط إلى الإجمالي المقدَّر لجميع المصايد.

بالنظر إلى المستقبل، ماذا سيكون دور المحيط العالمي في توفير الأطعمة البحرية غير المستزرعة لنحو ٩٫٨ مليارات شخص سيعيشون على كوكبنا بحلول عام ٢٠٥٠؟ تستند إحدى الطرق للإجابة عن هذا التساؤل إلى المبادئ البيئية الأساسية فيما يتعلق بكفاءة تحوُّل إجمالي الإنتاج الأولي الصافي للمحيطات العالمية عبر السلاسل الغذائية البحرية (انظر جدول ٨-١). باستخدام هذا النهج، يمكن تقسيم المحيط العالمي إلى ثلاثة نطاقات معينة بالمستويات المختلفة لإنتاجيتها الأولية. يتكون النطاق المحيطي الأكبر من جميع مناطق المحيط المفتوح للمحيط العالمي. وفيه أدنى مستوًى من متوسط الإنتاجية الأولية ولكنه يشغل أكبرَ مساحة حتى الآن، وهي ٩٠ في المائة من المساحة الإجمالية للمحيط العالمي. النطاق الثاني هو النطاق الساحلي الذي يشمل جميع المياه الساحلية البحرية. ويتميز بإنتاجيةٍ أولية أعلى غير أن مساحته أصغر بكثير؛ فما هي إلا أقل من ١٠ في المائة. النطاق الثالث هو نطاق التيارات الصاعدة، ويشمل جميع مناطق التيارات الصاعدة الرئيسية. ويشغل مساحة صغيرة — نحو واحدٍ في المائة من المحيط العالمي — ولكن يتميز بمتوسط مرتفع جدًّا في إنتاجيته الأولية.

الخطوة التالية هي تقدير عدد المستويات الغذائية داخل الشبكات الغذائية في كل نطاق. من المنطقي تقسيمُها إلى ما متوسطه خمسة مستويات غذائية بين الكائنات المنتجة الأولية والأسماك المستهلكة في الشبكات الغذائية المعقَّدة في المحيط المفتوح (انظر الفصل الثاني). بالمقارنة بين النطاقات المختلفة، نجد الشبكات الغذائية في مناطق التيارات الصاعدة بسيطةً للغاية. وتُعد مصايد البَلَم مثالًا على ذلك؛ حيث يتغذى سمك البَلَم في هذه المناطق مباشرةً على العوالق النباتية أو العوالق الحيوانية، ومن ثَم يغيب مستوًى غذائيٌّ واحد أو مستويان من مستويات الكائنات المنتجة الأولية. بذلك، يمكن تقسيم المنطقة بين الكائنات المنتجة الأولية والأسماك إلى مستوًى ونصف من المستويات الغذائية. أما عن النطاق الساحلي، فيمكن اعتباره ذا طبيعة انتقالية بين المحيط المفتوح ومناطق التيارات الصاعدة ويمكن تقسيمه إلى ثلاثة مستويات غذائية.

يمكن إذن تقديرُ كفاءة انتقال الطاقة بين كل مستوًى غذائي في كل نطاق. تقلُّ كفاءة انتقال الطاقة في الشبكات الغذائية المعقَّدة والمتفرقة في المحيطات المفتوحة ويمكن تقدير نسبتها بعشرة في المائة. وعلى النقيض من ذلك، تزداد كفاءة انتقال الطاقة بكثيرٍ في الشبكات الغذائية البسيطة والمركَّزة في مناطق التيارات الصاعدة، ويمكن تقدير نسبتها بعشرين في المائة. ومن ثَم يمكن تقدير نسبةٍ متوسطة هي ١٥ في المائة للنطاق الساحلي.

جدول ٨-١: إجمالي الإنتاج السمكي السنوي المقدَّر للمحيط العالمي (من أبرشية رايثر المدنية ١٩٦٩)

النطاق	النسبة من المحيط	متوسط الإنتاجية (بالجرام من الكربون لكل متر مربع في السنة)	إجماليُّ الإنتاج الأولي (بالمليار طن من الكربون في السنة)	عدد المستويات الغذائية	نسبة الكفاءة	الإنتاج السمكي (بالطن من الوزن الطازج)
محيطي	٩٠,٠	٥٠	١٦,٣	٥	١٠	١,٦ مليون
ساحلي	٩,٩	١٠٠	٣,٦	٣	١٥	١٢٠ مليونًا
التيارات الصاعدة	٠,١	٣٠٠	٠,١	١,٥	٢٠	٢٤٠ مليونًا تقريبًا
الإجمالي						٢٤٠ مليونًا تقريبًا

بتجميع بيانات الإنتاجية الأولية، وعدد مستويات التغذية، ونسب كفاءة انتقال الطاقة في كل نطاق؛ يمكن تقدير الإنتاج السنوي التقريبي للأسماك في كل نطاق، وبناءً عليه تقدير إجمالي إنتاج الأسماك في العالم، وهذا التقدير هو ٢٤٠ مليون طن متري في السنة (انظر جدول ٨-١).

إحدى الرُّؤى المستمَدة من تحليل أبرشية رايثر المدنية هي الأهمية الفائقة للمناطق الساحلية ومناطق التيارات الصاعدة في إنتاج الأسماك نظرًا إلى إنتاجيتها الأولية العالية وشبكاتها الغذائية الأكثر بساطةً وكفاءة. يُستخرج من النطاقَين معًا جميعُ إنتاج الأسماك تقريبًا في المحيط العالمي. أما المحيط المفتوح، فعلى الرغم من حجمه الهائل، لا يأتي منه سوى القليل من الإنتاج السمكي. يتَّسق هذا مع الحقائق المعروفة؛ إذ إن أكبر مصايد الأسماك التجارية — لأسماك الكلوبيويد، والقديات، والأسماك المفلطحة — توجد كلها في مناطق التيارات الصاعدة والمناطق الساحلية من المحيط العالمي.

الاستثناء من ذلك هو مصايد المحيطات المفتوحة لأنواعٍ مثل التونة والماكريل، وهي المفترسات العليا في النظام المحيطي الشاسع.

ليس كلُّ الإنتاج السمكي السنوي الذي يُقدر بـ ٢٤٠ مليون طن متاحًا للصيد. فإذا استُغِل بالكامل كل عام فسينفد مخزون الأسماك بسرعة ليصل إلى مستويات غير مستدامة. كما يجب مشاركة القدْر الكبير من هذا الإنتاج السمكي مع المفترسات العليا الأخرى إلى جانب البشر — مثل الثدييات البحرية، وأسماك القرش، والطيور البحرية — ومن المستحيل تحديدُ موقع جميع مخزونات الأسماك واستغلالها بالمستويات المثلى في جميع الأوقات. على هذا الأساس، فمن المعقول افتراضُ أن حدًّا أقصى بمقدار نحو ١٠٠ مليون طن من الأسماك سيكون متاحًا لاستهلاك البشر على أساسٍ مستدام كل عام.

توفِّر هذه الطرقُ وغيرها من الطرق المماثلة دعمًا نظريًّا لتقدير كمية الأطعمة البحرية التي يمكن للبشر توقعُ الحصول عليها بشكلٍ مستدام من المحيط العالمي استنادًا إلى المبادئ البيئية. وأهمُّ ما في الأمر هو أن المصيد العالمي الفعلي من الأطعمة البحرية، والذي يُقدَّر حاليًّا بنحو ١٢٠ مليون طن، يتجاوز الحدود النظرية. علاوةً على ذلك، يشهد المصيد العالمي الآن ركودًا أو تراجعًا تدريجيًّا على الرغم من الزيادة الإجمالية في جهود الصيد من حيث أحجامُ أساطيل الصيد وكفاءتها. وهذه إشاراتٌ واضحة على أن مصايد الأسماك البحرية على مستوى العالم تشهد الآن استغلالًا مفرطًا. لذلك، لا يوجد سوى قدرٍ ضئيل، إن وُجد، من سقف الزيادة الممكنة في كمية الأطعمة البحرية غير المستزرعة

التي تأتي من المحيطات لإطعام الزيادة السكانية المزدهِرة في ظل طرقِ إدارتنا الحالية للمصايد.

يدعم هذا الاستنتاج الوضعَ غير المستقر على نحوٍ متزايد لموارد مصايد الأسماك البحرية العالمية. فالمعلومات الأخيرة من الفاو تُظهر أن ٦٠ في المائة من جميع مخزونات الأسماك مستغلة بالكامل؛ حيث يصل مصيدها الحالي إلى أقصى مستويات إنتاجيتها المستدامة ولا يوجد مجالٌ لمزيد من التوسع. ثمة نسبة ٣٣ في المائة أخرى من مخزونات الأسماك تتعرض للصيد الجائر وتشهد أعدادها انخفاضًا أو تدهورًا (مقارنةً بنسبة ١٠ في المائة في عام ١٩٧٤)، ولا تتعدى النسبة غير المستغلة من المخزونات السبعة في المائة. يرسم هذا صورةً قاتمة عن حالة مصايد الأسماك البحرية في العالم والتساؤل الفعلي المطروح الآن لا يتعلق بما إذا كان بإمكاننا صيدُ المزيد من الأسماك من المحيطات، ولكن يتعلق بما إذا كان بإمكاننا التعامل مع كمية الأسماك التي نصطادها حاليًّا على نحوٍ مستدام ومسئول، حيث تُمثل هذه الكمية مصدرًا حيويًّا لغذاء الإنسان. من الواضح أن نسبة الزيادة في الغذاء التي مقدارها ٧٠ في المائة أو نحو ذلك اللازمة لإطعام نحو ٩٫٨ مليارات شخص يجب أن تأتيَ من مكانٍ آخر. تساعد حاليًّا الزراعة المائية البحرية على تلبية الطلب على الأطعمة البحرية؛ ففي عام ٢٠١٦ أُنتِج ما مجموعه ٢٩ مليون طن من الأطعمة البحرية المستزرعة بالإضافة إلى الكمية التقريبية من الأطعمة البحرية غير المستزرعة، والتي تبلغ ١٢٠ مليون طن.

لا يدمِّر الصيد الجائر الأنواع المستهدفة فحسب، بل يؤثِّر أيضًا على آلية عمل الأنظمة البيئية البحرية التي هي جزءٌ منها، الأمر الذي يحدُث في كثيرٍ من الأحيان بطرقٍ غير متوقَّعة. يُشكِّل تدهور مصايد أسماك القد في شمال غرب المحيط الأطلنطي مثالًا جيدًا على التأثيرات الهائلة للصيد الجائر على بقية الشبكة الغذائية. فقد كانت أسماك القد وفيرةً في الساحل الشمالي الشرقي للولايات المتحدة الأمريكية ولكن المصايد تدهورت بسبب الصيد الجائر في أوائل تسعينيَّات القرن العشرين. وذلك لأن سمك القد هو أحد المفترسات الرئيسية للكركند ومع إزالته من النظام البيئي تفاقمَت أعداد الكركند. لا يوجد حتى الآن أيُّ مؤشر على استعادة مصايد سمك القد، ومن ثَم يبدو أن هذا التحوُّل إلى نظامٍ بيئي يهيمن عليه الكركند هو وضع جديد طويل المدى. يستفيد صيادو الكركند في الوقت الحاليِّ من أعداده الكبيرة، ولكن تجمُّعه بأعداد كبيرة، إضافةً إلى الإجهاد المرتبط باحترار المحيطات، يجعله عرضةً للمرض الذي أهلك مخزون الكركند في مناطقَ أخرى. ومن الأمثلة

الأخرى على تأثيرات الصيد الجائر على النظام البيئي مصايد أسماك السردين والبَلَم قبالة الساحل الجنوبي الغربي لأفريقيا. تدهورت مصايد الأسماك هذه في سبعينيَّات القرن العشرين نتيجةَ مزيجٍ من الصيد الجائر والتغيرات في الظروف البيئية. وسرعان ما حل محلَّ السردين والبَلَم أعدادٌ كبيرة من أسماك الفصيلة القوبيونية وقناديل البحر، التي هي أقلُّ في قيمتها الغذائية بكثير. نتيجةً لذلك، قلَّت أعداد الحيوانات الأخرى في النظام البيئي، التي كانت تتغذى في السابق على أسماك السردين والبَلَم ذات القيمة الغذائية العالية، ويشمل ذلك البطاريق وطيور الأطيش بالإضافة إلى العديد من أنواع سمك النازلي التي كانت مصايدها مزدهرةً في الماضي. يبدو هذا أيضًا تحوُّلًا طويلَ الأجل إلى نظام بيئي جديد أقلَّ تنوعًا وإنتاجية. تُظهر هذه الأمثلةُ أن المسئولين عن إدارة مصايد الأسماك لا يتعيَّن عليهم فحسب أن يتعاملوا مع الأنواع المستهدفة، بل عليهم أيضًا اتخاذ نهجٍ أوسعَ نطاقًا «يستند إلى الأنظمة البيئية» لإدارة مصايد الأسماك التي تتطلب فهمًا أكبرَ بكثير لكيفية التأثير المتبادل بين جميع الكائنات الحية في مختلف المستويات الغذائية في النظام البيئي.

مستقبل مصايد الأسماك البحرية: آخر الأطعمة غير المستزرعة

من الثابت الآن أنه من الصعب للغاية على الدول إدارة الاستغلال المفرط والسيطرة على الصيد غير المشروع في مواجهة الطلب المتزايد باستمرارٍ على الأطعمة البحرية غير المستزرعة عالية القيمة الغذائية، الذي يؤجِّجه النموُّ السكاني العالمي الذي يتسم بالسرعة والثراء. على الحكومات حول العالم العمل بجهدٍ أكبر لتحقيق مراقبةٍ أفضل لمستويات المخزون السمكي، وفرض قيود على الصيد، وتقليل الجهد المبذول في الصيد، وقمع الصيد غير القانوني لإتاحة الفرصة لإعادة تكوُّن المخزون واستعادة الأنظمة البيئية. كما يجب أيضًا أن يكونوا مستعدِّين لاتخاذ القرارات الصعبة التي لا تحظى بشعبيةٍ كبيرة؛ من أجل إغلاق مصايد الأسماك التي لا تُدار إدارةً مستدامة. وعلى تجار التجزئة ومستهلكي الأطعمة البحرية دورٌ مهم كذلك. فالاستغلال المفرط للمخزونات السمكية غالبًا ما يكون مدفوعًا بطلب المستهلكين، ولا مبالاتهم، وافتقارهم للمعرفة. إذا تلقَّى المستهلكون الوعي الصحيح بمشكلات الصيد الجائر، فمن شأنهم أن يكونوا في وضعٍ أفضلَ لاتخاذ قرارات بالامتناع عن شراء الأنواع التي تُصطاد بطرق غير مستدامة. على سبيل المثال، يعتمد

مجلس الإشراف البحري (MSC) مصايدَ الأسماك التي يَعُد علماء الأحياء البحرية طرقَ صيدها مستدامةً في تقييماتهم المستقلَّة. وتحمل منتجات الأطعمة البحرية المعبَّأة التي تأتي من مصايد الأسماك المعتمدة من مجلس الإشراف البحري ملصقًا أزرقَ يمكن تمييزه بسهولة. وبالمثل، يُصدر الصندوق العالمي للطبيعة أدلةً خاصة بكل بلد توفر معلوماتٍ عن حالة كل مخزون من مخزونات الأسماك على حدةٍ وتمييزات للأنواع بالألوان الأخضر، أو الأصفر، أو الأحمر حسب مستوى استدامتها.

ثمَّة بعض التقدُّم المُحرَز في الآونة الأخيرة في إعادة تكوين مخزونات الأسماك التي تعرضَت للصيد الجائر، ولا سيما في البلدان المتقدمة التي تتمتَّع بأنظمة إدارة مُحسَّنة. على سبيل المثال، زادت نسبة الاستدامة في صيد مخزونات الأسماك في المياه الأمريكية من ٥٣ في المائة في عام ٢٠٠٥ إلى ٧٤ في المائة في عام ٢٠١٦، وفي المياه الأسترالية من ٢٧ في المائة في عام ٢٠٠٤ إلى ٦٩ في المائة في عام ٢٠١٥. ولكن الإفراط في الصيد في تزايد في البلدانِ الأقلِّ نموًّا بسبب محدودية المراقبة، والإدارة، والقدرة على إنفاذ القوانين. إن عكس هذا الاتجاه وإعادة تكوين المخزونات المستنفدة هو مشروعٌ مهم للغاية للحفاظ على تنوُّع الأنظمة البيئية البحرية وسلامتها والإبقاء على آخرِ مصدرٍ مهم للبشر من الأطعمة غير المستزرعة.

دَور المحميَّات البحرية في إدارة مصايد الأسماك

توفِّر المناطق البحرية المحمية «المحظورة» مساحةً لا يمكن أن يصيد فيها الصيادون الأسماكَ واللافقاريات لأغراض ترفيهية وتجارية. يساعد هذا الأنواعَ على تزايد أعدادها داخل المحمية البحرية، وعلى العيش مُددًا أطول، والوصول إلى أحجام أجسام أكبر. ويمكن للحيوانات الأكبر حجمًا أن تُنتِج أعدادًا أكبرَ من البيض، في حين أنه كلما طالت حياة الحيوان، زادت مرَّات تكاثره. لذلك، تُنتِج الحيوانات المُعمِّرة ذاتُ الأجسام الكبيرة التي تعيش في المحميات البحرية كمياتٍ كبيرةً من البيض واليرقات التي تشقُّ طريقها خارج المحمية وتُعزز نشاط المخزونات المستنفَدة في المناطق المجاورة. كما أن للمحميات البحرية تأثيرًا «غير مباشر». فمع نموِّ أعداد الأنواع المتنقلة، مثل الأسماك والكركند، تتشبَّع المنطقة المحمية بها في نهاية المطاف، وتبدأ في الانتشار في المناطق غير المحمية حيث تدعم المصايد الترفيهية والتجارية. ليس مستغربًا إذن، كما لاحظ الكثير من الصيادين، أن أفضلَ عمليات الصيد تكون في كثيرٍ من الأحيان بجوار المحميات الطبيعية القائمة.

التساؤل الأساسي المطروح هو عن قدْر المساحة من المحيط العالمي اللازم حمايتُها لتحقيق استعادةٍ مُجدية للأنظمة البيئية للمحيطات في كوكبنا وإتاحة الفرصة لإعادة تكوُّن المخزونات السمكية لتصل إلى الكميات التي توفِّر بها عائداتٍ تجاريةً مستقرة لصناعة صيد الأسماك وإمدادًا مستدامًا وآمنًا للبشر من الأطعمة البحرية غير المستزرعة. يُجمِع علماء الأحياء البحرية بشكلٍ متزايد على أن وجوب إنشاء شبكة من المحميات البحرية المحظورة تغطي أكثرَ من ٣٠ في المائة من مساحة المحيط العالمي وإدارتها على النحو الأكمل لتحقيق ذلك، غير أن بعض علماء البيئة يعتقدون الآن أن نصف مساحة الأرض ومن ثَم نصف مساحة المحيطات يجب حمايتها من التدخل البشري لوقف الخسارة في التنوُّع البيولوجي لكوكبنا.

يُعد إنشاءُ مثلِ هذه الشبكة من المناطق المحمية البحرية وإدارتها أمرًا عاليَ التكلفة، غير أن فوائده المتوقعة من شأنها تحقيقُ عائدٍ أعلى، بما في ذلك زيادة في إنتاجية مصايد الأسماك التجارية، وخلق عدد كبير من فرص العمل، وزيادة الدخل عبر زائري تلك المحميات. على سبيل المثال، في حالة إتاحة الفرصة لإعادة تكوُّن جميع المخزونات البحرية التي أُفرِط في صيدها ثم صِيدَت بطرقٍ مستدامة، يمكن أن يزيد المصيد العالمي بنحو ١٦٫٥ مليون طن سنويًّا وفقًا لتقديرات علماء مصايد الأسماك.

في عام ٢٠١٥، تبنَّت الأمم المتحدة خطةً للتنمية المستدامة للمحيطات من أجل «الحفاظ على المحيطات والبحار والموارد البحرية واستخدامها على نحوٍ مستدام». أحد أهداف الخطة هو أنه يجب حماية ١٠ في المائة على أقلِّ تقدير من المناطق الساحلية والبحرية بحلول عام ٢٠٢٠. وتوفِّر شهريًّا منصةٌ على الإنترنت، وهي منصة «بروتيكتيد بلانيت»، التي يديرها المركز العالمي لرصد الحفظ التابع للأمم المتحدة، إحصائياتٍ مُحدَّثةً عن تغطية المحميات البحرية على مستوى العالم. وتُظهر بياناتها أن تغطية المناطق المحمية البحرية في عام ٢٠٠٠ لم تتجاوز مليوني متر مربع، أو ٠٫٧ في المائة من مساحة المحيطات. منذ ذلك الحين، شهدت النسبة زيادةً بأكثر من ١٠ أضعاف مع إنشاء أكثرَ من ١٥ ألف محمية بحرية في جميع أنحاء العالم تغطي ٢٧ مليون كيلومتر مربع أو نحو ٧٫٥ في المائة من مساحة المحيطات. يُعد هذا تقدمًا جيدًا، لكنه لا يزال أقلَّ بكثير من الحد الأدنى المطلوب، وهو ٣٠ في المائة. علاوةً على ذلك، فإن التغطية غيرُ متكافئة، حيث يُغطَّى أقلُّ من ثلاثة ملايين كيلومتر مربع، أو نحو ١١ في المائة من إجمالي التغطية، في أعالي البحار. يرجع هذا إلى الصعوبات القانونية التي ينطوي عليها حاليًّا إنشاء المناطق

البحرية المحمية في المياه الدولية. من المشكلات الأخرى أنه بسبب نقص الموارد، لا يحظى العديد من المحميات البحرية بالإدارة الجيدة، ومن ثَم يستمر الصيد فيها كما كان قبل تخصيصها للحماية. استجابةً لذلك، يُعِدُّ الاتحاد الدولي لحفظ البيئة «قائمةً خضراء» بالمناطق البحرية المحمية التي تتحقَّق فيها معاييرُ الإدارة المطلوبة لتقديم نتائج واقعية لجهود الحفاظ على البيئة.

بالطبع لن تُعالج المناطق البحرية المحمية جميعَ مشكلات المحيطات، وما هي إلا إحدى الأدوات لإدارتها بكفاءة. وبعيدًا عن الصيد الجائر، تتعرَّض الأنظمة البيئية البحرية لضغوط من التلوث وتأثيرات تغيُّر المناخ من احترار المحيطات والتحمُّض، وكلها أمورٌ تتجاوز حدودَ المحميات البحرية وتعمل بشكلٍ متآزر للحد من قدرة الأنظمة البيئية البحرية على العمل بشكل طبيعي. يستلزم الأمر استجاباتٍ وأدوات أخرى لمعالجة هذه القضايا.

الفصل التاسع

مستقبل محيطاتنا

كما تناولنا طَوال هذا الكتاب؛ تغيَّرت الأنظمة البيئة البحرية في عصر الأنثروبوسين مقارنةً بما كانت فيما قبل العصر الصناعي، وقد تسارعَت وتيرةُ التغيير تسارعًا كبيرًا على مدى العقود الأربعة الماضية. فكيف سيكون حال محيطاتنا في ٢٠٥٠؟ هل مُقدَّر علينا البقاء على المسار السلبي الراهن؟ أم هل نحن قادرون على التخطيط لمسار جديد والتخلص من العديد من أشد التأثيرات خطورةً التي تعرضَت لها المحيطات حتى الآن؟

نهاية الحياة البرية في المحيطات

كشفَت دراسةٌ حديثة عن التأثيرات البشرية على الأنظمة البيئية للمحيطات العالمية عن المدى الكامل للتأثير البشري على البيئة البحرية، وشكَّلَت مرجعًا في عام ٢٠١٨ لقياس التغييرات المستقبلية، سواءٌ أكانت إيجابية أم سلبية. تضمَّنَت هذا الدراسة التحليلية تحديدَ مناطق «البَرِّيَّة البحرية»، وهي الأماكن البحرية التي تكون فيها آليات عمل الأنظمة البيئية البحرية طبيعية إلى حدٍّ كبير وبعيدة في الغالب عن الاضطرابات التي يتسبب فيها النشاط البشري. قسَّم الباحثون المحيط العالمي إلى ١٥ منطقةً جغرافية وسجَّلوا كل منطقة حسب الأعداد، والكثافة، والآثار التراكمية لعوامل الإجهاد البشرية؛ بما في ذلك التلوث، والصيد الجائر، والأنواع المجتاحة، وتغيُّر المناخ. وقد اكتشفوا أنه عندما تضمَّنت الدراسة عواملَ الإجهاد الناتجة عن تغيُّر المناخ (التي تضمنَت ارتفاع درجات حرارة المحيطات وتحمُّضها) لم يتبقَّ ما يمكن وصفُه بالحياة البرية في المحيطات في أي مكان على الكوكب؛ لأن آثار تغيُّر المناخ أصبحَت واسعة الانتشار، ولا يمكن السيطرة عليها. وحتى قبل تضمين عوامل الإجهاد الناتجة عن تغيُّر المناخ في الدراسة، لم يكن من الممكن اعتبارُ أن ثمة حياةً بريَّة سوى في نحو ١٣ في المائة من مساحة المحيطات. كانت هذه المناطق تقع

بشكل رئيسي في أجزاء من المحيط المفتوح في نصف الكرة الجنوبي والمحيط الجنوبي والمحيط المتجمد الشمالي. الاستنتاج المؤلم من هذه الدراسات وغيرها هو أن الأنشطة البشرية قد أثرَت على المحيطات في كل مكان، وأن فكرة أنه لا تزال هناك أنظمةٌ بيئية بحرية سليمة ويمكن «حفظها»؛ لم تَعُد معقولة. التحدي الذي يواجه البشر الآن هو إيجادُ طرق لتحقيق الاستقرار ومنع المزيد من التدهور للأنظمة البيئية البحرية والمضي في طريق استعادة سلامة المحيطات. ويبقى أن نرى ما إذا كان سيتحقق لدى المجتمع الإدراكُ التامُّ والاعتراف بالمشكلات التي تواجه المحيطات، والاهتمامُ الكافي بالبيئة البحرية بما يكفل الإسراعَ في تنفيذ التدابير اللازمة لاستعادة الأنظمة البيئية البحرية. فعدم القيام بذلك من شأنه أن يُسفر عن نتائجَ كارثيةٍ في نهاية المطاف. إن التدابير التي سيتخذها البشر في العقود القليلة المقبلة هي ما سيُقرر النتيجة.

أنا متفائلٌ بأن المجتمع ومؤسساته سيستجيبان بعقلانية ويختاران المسار الذي يؤهِّلنا لاستعادة سلامة المحيطات وحماية المنافع العديدة التي توفِّرها لنا. يستند موقفي هذا إلى معرفتي بأن الوعي، والاهتمام، والمشاركة على الصعيدَين العام والإعلامي بشأن المسائل البيئية البحرية في تزايدٍ سريع، ولا سيما بين الشباب، كما تتوسَّع إلى البلدان الأقلِّ نموًّا. فهؤلاء الأفراد المطَّلعون سيفرضون ضغوطًا متزايدة على السياسيين، والمنظمات الدولية والمحلية، والشركات التي يتعاملون معها للتعاطي بشكل مسئول مع قضايا البيئة البحرية. علاوةً على ذلك، سيصبح بعض هؤلاء الأشخاص قادةً سياسيين ومتحدثين رسميين بارزين باسم قضايا البيئة البحرية، بينما سيُشكِّل آخرون جزءًا من موجة جديدة من علماء الأحياء البحرية الذين يمكنهم أن يضَعونا على الطريق لاستعادة الأنظمة البيئية البحرية. مع وضعِ هذا في الاعتبار، سأطرح بإيجازٍ رؤيةً لحالة المحيط العالمي في عام ٢٠٥٠ في ١٠ نقاط فيما يلي. إنها نظرةٌ متفائلة في المقام الأول ولكنها واقعية تمامًا إذا أسرعنا ونفَّذنا العديدَ من الإجراءات التي هي قيد التنفيذ بالفعل وتحلَّينا بالجُرأة في تفعيل بعض الأساليب الجديدة.

المحيطات في عام ٢٠٥٠: مستقبل واحد محتمل

في عام ٢٠٥٠، أصبحَت غالبية دول العالم أعضاءً نشطين في «هيئة دولية فعالة» مسئولة عن الإدارة الشاملة لمحيطات الكوكب. انبثقت هذه المنظمة من الاتحاد الدولي لحفظ الطبيعة، وتعمل بموجب إطارٍ قانوني دولي قدمَته أولَ الأمر اتفاقية الأمم المتحدة لقانون

البحار. وتعمل على تطوير وتنفيذ استراتيجيات طويلة الأجَل لإدارة البيئة البحرية للكوكب ومواردها، وعلى تنسيق ورصد الإجراءات والتقدُّم الذي يُحرزه أعضاؤها في تنفيذ هذه الاستراتيجيات. كما توفِّر تدابيرَ إنفاذ فعالةً في حالات عدم الامتثال. كما نحَّى أعضاء هذه الهيئة معظمَ خلافاتهم جانبًا فيما يتعلق بقضايا إدارة المحيطات التي كانت قائمةً على الأولويات القصيرة المدى والمصلحة الذاتية الوطنية؛ للتعاون بشكلٍ فعَّال من أجل تحقيق النتائج الطويلة الأجل المتفَق عليها؛ لاستعادة الأنظمة البيئية للمحيطات وإدارة مواردها.

عولجت كذلك «أزمة الحطام البلاستيكي البحري» إلى حدٍّ كبير بفضل الموجة الكبيرة من الاهتمام المجتمعي التي استهضت الحكومات وأصحابَ الأعمال لاتخاذ التدابير المناسبة. فقد موَّلت الحكومات، ولا سيما في الدول الفقيرة، أنظمةً مُحسَّنة لجمع النُّفايات تمنع فقْدَ المواد البلاستيكية من اليابسة إلى المحيطات عبر الأنهار. كما انخفض الطلب على البلاستيك انخفاضًا كبيرًا بسبب الحظر العالمي لاستخدام الأكياس البلاستيكية التي تُستخدم مرةً واحدة في التعبئة والتغليف. بالإضافة إلى ذلك، توجد أنظمةٌ فعالة لجمع البلاستيك وإعادة تدويره في منتجاتٍ جديدة مما يُقلل بشكل كبير من كمية البلاستيك الجديدة الصُّنع. بعد مواجهة بعض المشكلات التأسيسية الأولية، أصبحت أنظمة إزالة الحطام البلاستيكي من الدوَّامات المحيطية ساريةً وانخفضت كمية البلاستيك في مواضع الدوامات بمقدار ثلاثة أرباع، مما يُقلل الضرر الذي يَلحق بالكائنات البحرية ويُقلل أيضًا من مصدر الكثير من الجسيمات البلاستيكية الدقيقة في المحيطات. أصبحت الشواطئ والمشاهد البحرية حول العالم الآن أكثرَ نظافةً كما قلَّت للغاية مستوياتُ الجسيمات البلاستيكية الدقيقة في الأطعمة البحرية.

انخفضت كمياتُ «فقدان المواد الغذائية» في المحيطات إلى النصف نتيجةً للتطبيق الواسع النطاق لممارسات زراعية أكثرَ استدامة في معظم البلدان مدفوعةً باهتمام المستهلكين، والتشريعات الفعَّالة، وتحسين وعي المزارعين وأدوات دعم القرار التي تستهدفهم. بالإضافة إلى ذلك، أنشأتْ معظمُ المدن الساحلية أنظمةً فعالة لإدارة صرف المخلفات. وقد أدَّت هذه المبادرات إلى حدٍّ كبير إلى تقليل فقدان النيتروجين والفوسفور في البيئة الساحلية، وقد انخفضَت أعداد وأحجام المناطق الميتة في المحيطات الساحلية للمرة الأولى. كما أن إزهار العوالق النباتية الضارَّة آخذٌ في التناقص.

توجد شبكة عالمية من «المناطق المحمية البحرية المحظورة» المُدارة بكفاءة والمطبقة معاييرها على النحو الواجب، وتغطي أكثرَ من ٣٠ في المائة من مساحة المحيط العالمي،

ونصف هذه التغطية هي في أعالي البحار نظرًا إلى حل العديد من الصعوبات القانونية التي ينطوي عليها إنشاء المحميات البحرية في المياه الدولية. تُعوَّض تكلفة إدارة هذه الشبكة إلى حدٍّ كبير بارتفاع ملحوظ في العائد والدخل من مصايد الأسماك التي تستفيد من تأثيرات تحسين مصايد الأسماك التي توفِّرها المناطق البحرية المحمية. نتيجةً لذلك، ترعى العديد من شركات الصيد الكبيرة الإدارة المستمرة للمحميات البحرية. كما تتلقى المناطق المحمية البحرية دخلًا كبيرًا من السائحين البحريين الذين يمارسون الغطس والغوص في مياهها المحمية. وقد أصبحت شبكة المناطق المحمية البحرية ناجحةً للغاية ومدعومة على نطاق واسع؛ إذ حدَّدت هيئة إدارة المحيط الدولي هدفًا جديدًا بتغطية ٥٠ في المائة من المحيطات العالمية بحلول عام ٢٠٧٠.

أصبحت أيضًا «ممارساتُ إدارة مصايد الأسماك المُحسَّنة» على أساس نهجٍ يستند إلى الأنظمة البيئية أمرًا شائعًا في معظم البلدان، مع مساعدة البلدان الغنية للبلدان الأقلِّ ثراءً على التطور، والتنفيذ، وفرض التدابير لبرامج إدارة محسنة لمصايد الأسماك وتطبيقها على مصايد الأسماك التي لم يسبق إخضاعها لقواعد تنظيمية. كما يوجد تحسنٌ كبير في رصد مستويات المخزون وإنفاذ حدود المصيد بين جميع دول الصيد البحري. فتشمل الآن تقاريرُ البلدان عن مصايد الأطعمة البحرية المقدمة للفاو بياناتٍ عن المصيد العرضي، وكذلك المصيد التقديري من مصايد الأسماك الحِرفية والترفيهية، مما يجعل تقارير الفاو السنوية أكثرَ تمثيلًا للمصيد البحري العالمي الفعلي. وقد أُلغي الصيد غير المشروع بالكامل تقريبًا نتيجةً لعمليات الرصد والتعقب الممارَسة على جميع قوارب الصيد في المحيطات باستخدام بيانات رادارات الأقمار الاصطناعية التي يُحصل عليها من أسطولٍ كبير من أقمار كيوبستار الاصطناعية التي تدور حول الكوكب. كما قلَّت جهود الصيد العالمي إلى حدٍّ كبير مع تعيين أشخاص ممن كانوا يعملون في السابق في صناعة صيد الأسماك في مراقبة وإدارة المحميات البحرية والسياحة البحرية. انتقلت صناعة صيد الأسماك إلى نموذج أعمال، مبدؤه «صيد أقل ومكسب أكثر» مع التركيز على الحصول على أفضلِ أسعار للمنتجات السمكية العالية الجودة التي تُصاد بطرقٍ مستدامة. وقد تراجع الصيد بشِباك الجر القاعية إلى عددٍ قليل من المناطق الصغيرة في أرضية المحيط الخاضعة للاعتماد والرصد. فجميع تجَّار التجزئة الكبار لا يوردون سوى منتجات الأطعمة البحرية المصيدة من مصايد الأسماك المعتمدة؛ باعتبارها مستدامةً لدى المنظمات المعترف بها. كما يستخدم المستهلكون المطلِعون بانتظام «الرموز الذكية» على

الأطعمة البحرية المعبَّأة للتأكُّد من مَنشئها. ولأول مرة منذ عدة عقود، يُعاد تكوُّن الكثير من المخزونات السمكية التي سبق واستُنفدت، ويتحسَّن التنوُّع البيولوجي والاستقرار في مجموعةٍ من الأنظمة البيئية البحرية مع استعادةِ أعدادٍ من الحيوانات البحرية المهمة بيئيًّا مثل الأسماك المفترسة، والحيتان، وأسماك القرش.

يخضع المحيط العالمي «للرصد المُكثَّف» باستخدام مجموعة واسعة من أجهزة الاستشعار المُثبَّتة على مَراسي المحيط، والغواصات الشراعية الآلية، والمرْكبات الذاتية القيادة تحت الماء، والأقمار الاصطناعية. يوفِّر هذا كمياتٍ هائلةً من البيانات الآنيَّة حول الحالة الفيزيائية، والكيميائية، والبيولوجية للبيئة البحرية التي تُحلَّل وتوضَع الصور لها باستخدام تقنيات الحوسبة المتقدمة وتُتاح على نطاقٍ واسع بوصفها مصادرَ بيانات مجانية ومفتوحة. توفِّر هذه المعلومة صورةً شاملة وتفصيلية عن حالة المحيطات وتُحدَّث شهريًّا للاسترشاد بها في قرارات الإدارة المستمرة وتمكين قياس التقدُّم من أجل وضع الأهداف المتَّفق عليه لاستعادة سلامة المحيطات.

يتَّجه الكثير من الجهود الآن إلى «الإدارة والتكيُّف مع الآثار المستمرَّة لأزمة المناخ التي يتسبب فيها الإنسان» في الأنظمة البيئية البحرية ومصايد الأسماك. على الرغم من إحراز العديد من البلدان تقدمًا في إزالة الكربون من اقتصاداتها؛ فلا يزال العالم يُناضل لتحقيق أهداف خفض الانبعاثات لاتفاق باريس ٢٠١٥، من أجل الحفاظ على الزيادة في متوسط درجة حرارة الهواء العالمية بأقلَّ من درجتين مئويتين. فالكوكب في طريقه ليشهد ارتفاعًا في درجة الحرارة بمقدار ٢٫٥ درجة مئوية قبل أن يستقرَّ المناخ في وقتٍ ما بعد عام ٢١٠٠ وتبدأ غازات الدفيئة في الغلاف الجوي في الانخفاض. وكما كان متوقعًا، تحوَّل أكثر من ٨٠ في المائة من الشعاب المرجانية على الكوكب إلى أنظمةٍ تهيمن عليها الطحالب الكبيرة نتيجةً لسلسلة من أحداث الابيضاض العالمية المتتالية التي تسبَّبَت فيها الأحوال القاسية لدرجات حرارة أسطح المحيطات. أما البقع المتبقية من الشعاب المرجانية السليمة نسبيًّا التي تعيش في ملاجئ تغيُّر المناخ في أماكنَ متفرقة من المحيطات المدارية، فتُدار وتُحمى بعنايةٍ من الصيد الجائر، والتلوث، وتفشي أعداد نجوم البحر المكلَّلة بالشَّوك كي تظلَّ صامدة في مواجهة الارتفاع المستمر في درجات حرارة المحيطات، وتحمُّض المحيطات، وزيادة وتيرة العواصف وشدتها. ومن المأمول أن تُعيد الشعاب المرجانية الباقية في هذه المواقع إعمارَ المناطق المجاورة عندما يستقر المناخ على الكوكب. التدخلات النشطة جاريةٌ على قدمٍ وساق لاستعادة الأنظمة البيئية للشعاب المرجانية جزئيًّا في بعض

مواقعها الرئيسية. ويشمل ذلك تقنيات الدفق الجيني المُساعَد والتطور المُساعَد. تُستخدم تقنيات التحرير الجيني لتصميم سُلالات من الشعاب المرجانية لديها قدرةٌ أكبر على تحمُّل الإجهاد الحراري وتحمُّض مياه البحر. وتُستزرع هذه الشعاب بأعداد كبيرة في مرافقَ على اليابسة، ثم تُستزرع خارجيًّا في مواقع مواتية لإحياء بعض الأنظمة البيئية للشعاب المرجانية جزئيًّا واستعادة بعض خدماتها. كما تُنشَأ موائل اصطناعية شبيهة بموائل الشعاب المرجانية في العديد من الأماكن لإعادة إنشاء بعض مصايد الشعاب المرجانية والمساعدة في حماية السواحل المعرَّضة للخطر.

«قلَّ بشكلٍ كبير التنقيب عن النفط والغاز على الشواطئ»، حيث حلَّت محلَّ هذين الوقودين الأحفوريين إلى حدٍّ كبير مصادرُ الطاقة المتجددة المنتشرة على اليابسة وفي المحيطات. خفض هذا كثيرًا من التلوث البحري الناتج عن التنقيب عن النفط ونقله. كما أن تحوُّل أنظمة النقل إلى العمل بالكهرباء قد أسهم أيضًا في الانخفاض الكبير في تسرُّب النفط إلى البيئة الساحلية الناتج عن استهلاك مشتقاته في تشغيل السيارات والشاحنات.

تتسارع عمليات «التصنيع في المحيطات» من أجل التعدين في قيعان البحار، وتطويرات طاقة الرياح والأمواج على الشواطئ، واستزراع المحيطات، غير أن هذه الأنشطة تُقيَّم وتُدار بدقة. ويشهد استكشاف الأنظمة البيئية في أعماق المحيطات تقدمًا كبيرًا باستخدام المرْكبات الذاتية القيادة تحت الماء، وجيل جديد من المرْكبات المأهولة في أعماق المحيطات. تُستخدم هذه المعرفة لتقييم آثار خُطط التعدين في قيعان البحار. وتشمل مشاريعُ هندسة المناخ الامتناعَ عن تخصيب المحيطات بالحديد على نطاقٍ واسع نظرًا إلى خطره الشديد على البيئة.

تستثمر الحكومات وأصحاب الأعمال بكثافة في «البحث والتطوير في مجال البحار» لتوفير المعرفة اللازمة للتكيُّف مع اضطرابات تغيُّر المناخ التي تؤثِّر على الأنظمة البيئية البحرية واستعادة البيئة البحرية ومواردها. كما يعمل معًا كلٌّ من علماء الأحياء البحرية، وعلماء البيئة، وعلماء البيولوجيا الجزيئية، وعلماء الأحياء الدقيقة، والكيميائيين، وعلماء المحيطات الفيزيائيين، ومهندسي أجهزة الاستشعار والروبوتات، وعلماء الكمبيوتر، وخبراء نُظم المعلومات على قضايا البيئية البحرية المعقَّدة.

وختامًا، يرسم هذا السيناريو لمستقبل المحيطات في عام ٢٠٥٠ مسارًا واحدًا ممكنًا. يوجد بالطبع العديد من السيناريوهات الأخرى الممكنة، بما في ذلك التي تكاد لا تبعث كثيرًا على التفاؤل. سيكون العَقد القادم هو العقدَ الذي سيُقرِّر فيه المجتمع شكلَ الحياة في المحيطات التي سنتركها وراءنا للأجيال القادمة.

قائمة المراجع والقراءات الإضافية

قراءاتٌ عامة

Knowlton, N. (2010) *Citizens of the Sea: Wondrous Creatures from the Census of Marine Life*. National Geographic Society.

Levinton, J. S. (2018) *Marine Biology: Function, Biodiversity, Ecology*. 5th Edition. New York: Oxford University Press.

Palumbi, S. R. and Palumbi, A. R. (2014) *The Extreme Life of the Sea*. Princeton and Oxford: Princeton University Press.

Roberts, C. (2012) *Ocean of Life*. London: Penguin Group.

Rossi, S. (2019) *Oceans in Decline*. Basel: Springer Nature Switzerland AG.

Thomas, D. N. and Bowers, D. G. (2012, reprinted 2018) *Introducing Oceanography*. Edinburgh: Dunedin Academic Press Ltd.

المقدمة

Barbier, E. B. (2017) Marine ecosystem services. *Current Biology* 27, R507–10.

Hoegh-Guldberg, O. et al. (2015) *Reviving the Ocean Economy: The Case for Action—2015*. Geneva: WWF International.

United Nations Department of Economic and Social Affairs (2017) World population projected to reach 9.8 billion in 2050, and 11.2 billion

in 2100. (Online) Available from: https://www.un.org/development/desa/en/news/population/world-population-prospects-2017.html (Accessed 11 January 2019).

WWF-UK [GB]. (2018) Introducing the Sustainable Blue Economy Finance Principles. (Online) Available from: https://www.wwf.org.uk/updates/sustainable-blue-economy-finance-principles (Accessed 11 January 2019).

الفصل الأول: بيئة المحيطات

Bähr U. (ed.) (2017) *Ocean Atlas: Facts and Figures on the Threats to our Marine Ecosystems*. 1st Edition. Berlin: Heinrich Boll Foundation.

Charette, M. A. and Smith, W. H. F. (2010) The volume of the Earth's ocean. *Oceanography* 23 (2), 104–6.

Laffoley, D. and Baxter, J. M. (eds). (2016) *Explaining Ocean Warming: Causes, Scale, Effects and Consequences. Full Report.* Gland, Switzerland: IUCN.

Praetorius, S. K. (2018) North Atlantic circulation slows down. *Nature* 556, 180–1.

Quote Investigator (2017) Planet "Earth": we should have called it "Sea". (Online) Available from: https://quoteinvestigator.com/2017/01/25/water-planet/ (Accessed 11 January 2019).

USGS (2016) How much water is there on, in, and above the Earth? (Online) Available from: https://water.usgs.gov/edu/earthhowmuch.html (Accessed 11 January 2019).

Wessel, P., Sandwell, D. T., and Kim, S.-S. (2010) The global seamount census. *Oceanography* 23 (1), 24–33.

Wittmann, A. C. and Pörtner, H.-O. (2013) Sensitivities of extant animal taxa to ocean acidification. *Nature Climate Change* 3, 995–1001.

الفصل الثاني: العمليات البيولوجية البحرية

Bar-On, Y. M., Phillips, R., and Milo, R. (2018) The biomass distribution on Earth, *Proceedings of the National Academy of Sciences* (Online) 115 (25) 6506–11. Available from: DOI: 10.1073/pnas.1711842115 (Accessed 12 January 2019).

Biller, S. J., Berube, P. M., Lindell, D., and Chisholm, S. W. (2015) *Prochlorococcus:* the structure and function of collective diversity. *Nat Rev Microbiol.*13 (1), 13–27. Available from: DOI: 10.1038/nrmicro3378.

Brierley, A. S. (2017) Plankton. *Current Biology* 27, R478–83.

Bristow, L. A., Mohr, W., Ahmerkamp, S., and Kuypers, M. M. M. (2017) Nutrients that limit growth in the oceans. *Current Biology* 27, R474–8.

Carradec, Q., Pelletier, E., Da Silva, C., et al. (2018) A global ocean atlas of eukaryotic genes. *Nature Communications* (Online) 9, Article number 373. Available from: https://doi.org/10.1038/s41467-017-02342-1 (Accessed 19 January 2019).

Chisholm, S. W. (2017) *Prochlorococcus. Current Biology* 27, R447–8.

Coutinho, F. H., Silveira, C. B., Gregoracci, G. B., et al. (2017) Marine viruses discovered via metagenomics shed light on viral strategies throughout the oceans. *Nature Communications* (Online) 8, 15955. Available from: doi: 10.1038/ncomms15955 (Accessed 19 January 2019).

de Vargas, C., Audic, S., Henry, N., et al. (2017) Eukaryotic plankton diversity in the sunlit ocean. *Science* (Online) 348 (6237). Available from: DOI: 10.1126/science.1261605. (Accessed 19 January 2019).

Fenchel, T. (2008) The microbial loop—25 years later. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 366, 99–103.

Keeling, P. J. and del Campo, J. (2017) Marine protists are not just big bacteria. *Current Biology* 27, R541–9.

NASA (n.d.). *Oceancolor Web*. (Online) Available from: https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/about/ (Accessed 13 January 2019).

Pomeroy, L. R. (1974) The ocean's food web, a changing paradigm. *BioScience* 24 (9), 499–504.

Pomeroy, L. R., Williams, P. J. leB., Farooq Azam, F., and Hobbie, J. E. (2007) The microbial loop. *Oceanography* 20 (2), 28–33.

Powell, H. (2008) Fertilizing the ocean with iron. *Oceanus Magazine* 46 (1), 4–9. Available from: https://www.whoi.edu/oceanus/feature/fertilizing-the-ocean-with-iron.

Salazar, G. and Sunagawa, S. (2017) Marine microbial diversity. *Current Biology* 27, R489–94.

Suttle, C. A. (2007) Marine viruses—major players in the global system. *Nature Reviews Microbiology* 5, 801–12.

Tara Oceans (2015) Planktonic world: the new frontier. First scientific results from the Tara Oceans expedition. (Online) Available from: https://oceans.taraexpeditions.org/wp-content/uploads/2015/05/press-kit_tara-oceans.pdf (Accessed 11 January 2019).

Tollefson, J. (2017) Plankton-boosting project in Chile sparks controversy. *Nature* 345, 393–4.

الفصل الثالث: الحياة في المحيط الساحلي

Anderson, D. (2014) HABs in a changing world: a perspective on harmful algal blooms, their impacts, and research and management in a dynamic era of climactic and environmental change. *Harmful Algae 2012 (2012)*, 3–17. Available from: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4667985/.

Breitburg, D., Grégoire, M., and Isensee, K. (eds). (2018) *Global Ocean Oxygen Network 2018. The Ocean is Losing its Breath: Declining Oxygen in the World's Ocean and Coastal Waters.* IOC-UNESCO, IOC Technical Series, No. 137 40pp. Available from: http://www.fao.org/fishery/topic/14776/en.

De Poorter, M., Darby, C., and MacKay, J. (2009) *Marine Menace: Alien Invasive Species in the Marine Environment*. Gland, Switzerland: IUCN, 1–31.

Eriksen, M., Lebreton, L. C. M., Carson, H. S., Thiel, M., Moore, C. J., et al. (2014) Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. *PLOS ONE* (Online) 9 (12). e111913. Available from: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111913 (Accessed 13 January 2019).

Evans, S. M., Griffin, K. J., Blick, R. A. J., Poore, A. G. B., and Vergés A. (2018) Seagrass on the brink: decline of threatened seagrass *Posidonia australis* continues following protection. *PLoS ONE* (Online) 13 (4): e0190370. Available from: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190370 (Accessed 13 January 2019).

Food and Agriculture Organization of the United Nations (2019) Ballast waters: pollution and invasive species. (Online) Available from: http://www.fao.org/fishery/topic/14776/en (Accessed 13 January 2019).

Galloway, T. and Lewis, C. (2017) Marine microplastics. *Current Biology* 27, R445–6.

Irwin, A. (2018) How to solve a problem like plastics. *New Scientist* 238 (3178), 25–31.

Ling, S. D., Scheibling, R. E., Rassweiler, A., et al. (2015) Global regime shift dynamics of catastrophic sea urchin overgrazing. *Phil. Trans. R. Soc. B: Biological Sciences* (Online). Available from: http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0269 (Accessed 13 January 2019).

McClenachan, L., Jackson, J. B. C., and Newman, M. J. H. (2006) Conservation implications of historic sea turtle nesting beach loss. *Front. Ecol. Environ.* 4 (6), 290–6.

The Ocean Cleanup (2019) The largest cleanup in history. (Online) Available from: https://www.theoceancleanup.com/ (Accessed 13 January 2019).

Reynolds, P. L. (2018) Seagrass and seagrass beds. (Online) Available from: https://ocean.si.edu/ocean-life/plants-algae/seagrass-and-seagrass-beds (Accessed 13 January 2019).

Tegner, M. J. and Dayton, P. K. (2000) Ecosystem effects of fishing in kelp forest communities. *ICES Journal of Marine Science* 57, 579–89.

Unsworth, R. K. F. and Cullen-Unsworth, L. C. (2017) Seagrass meadows. *Current Biology* 27, R443–5.

الفصل الرابع: الأحياء البحرية في القطبين

Alfred-Wegener-Institut (2018) What goes on beneath the floes. (Online) Available from: https://www.awi.de/en/focus/sea-ice/life-in-and-underneath-sea-ice.html (Accessed 13 January 2019).

Atkinson, A., Siegel, V., Pakhomov, E., and Rothery, P. (2004) Long-term decline in krill stock and increase in salps within the Southern Ocean. *Nature* 432, 100–3.

Barnes, D. K. A. and Tarling, G. A. (2017) Polar oceans in a changing climate. *Current Biology* 27, R454–60.

Bowman, J. S. (2015). The relationship between sea ice bacterial community structure and biogeochemistry: a synthesis of current knowledge and known unknowns. *Elementa: Science of the Anthropocene* (Online) 3, 000072. Available from: DOI: http://doi.org/10.12952/journal.elementa.000072 (Accessed 14 January 2019).

FAO (2018) *The State of World Fisheries and Aquaculture 2018—Meeting the Sustainable Development Goals.* Rome. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

Kock, K.-H. (2007) Antarctic marine living resources—exploitation and its management in the Southern Ocean. *Antarctic Science* 19 (2), 231–8.

Miller, D. G. M. (1991) Exploitation of Antarctic marine living resources: a brief history and a possible approach to managing the krill fishery. *South African Journal of Marine Science* 10, 321–39.

National Snow & Ice Data Center (2018) State of the cryosphere: is the cryosphere sending signals about climate change? (Online) Available from: https://nsidc.org/cryosphere/sotc/sea_ice.html (Accessed 13 January 2019).

الفصل الخامس: الحياة البحرية في المناطق الاستوائية

Anthony, K., Bay, L. K., Costanza, R., Firn, J., et al. (2017) New interventions are needed to save coral reefs. *Nature Ecology & Evolution* 1, 1420–2.

Beyer, H. L., Kennedy, E. V., Beger, M., et al. (2018) Risk-sensitive planning for conserving coral reefs under rapid climate change. *Conservation Letters* (Online) 11 (6) e12587. Available from: https://doi.org/10.1111/conl.12587 (Accessed 14 January 2019).

Camp, E. F., Schoepf, V., Mumby, P. J., Hardtke, L. A., et al. (2018) The future of coral reefs subject to rapid climate change: lessons from natural extreme environments. *Front. Mar. Sci.* (Online) 5 (4). Available from: doi: 10.3389/fmars.2018.00004 (Accessed 14 January 2019).

Degan, B. (2017) Love connection: breakthrough fights crown-of-thorns starfish with pheromones. (Online) Available from: https://theconversation.com/love-connection-breakthrough-fights-crown-of-thorns-starfish-with-pheromones-75779 (Accessed 14 January 2019).

Guest, J. R., Edmunds, P. J., Gates, R. D., et al. (2018) A framework for identifying and characterising coral reef “oases” against a backdrop

of degradation. *J Appl Ecol*. 55 (6), 2865–75. Available from: https://doi.org/10.1111/1365%962664.13179.

Hall, M. R., Kocot, K. M., Baughman, K. W., Fernandez-Valverde, S. L., et al. (2017) The crown-of-thorns starfish genome as a guide for biocontrol of this coral reef pest. *Nature* 544 (7649), 231–4. Available from: doi: 10.1038/nature22033.

Hausheer, J. E. (2018) River pollution threatens Australia's great barrier reef. (Online) Available from: https://blog.nature.org/science/2018/12/03/river-pollution-threatens-australias-great-barrier-reef/ (Accessed 19 January 2019).

Hughes, T. P., Barnes, M. L., Bellwood, D. R., Cinner, J. E., et al. (2017) Coral reefs in the Anthropocene. *Nature* 546, 82–90.

Keith, S. A., Maynard, J. A., Edwards, A. J., et al. (2016) Coral mass spawning predicted by rapid seasonal rise in ocean temperature. *Proc. R. Soc. B* (Online) 283: 20160011. Available from: http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2016.0011 (Accessed 19 January 2019).

Libro, S. and Vollmer, S. V. (2016) Genetic signature of resistance to White Band Disease in the Caribbean Staghorn Coral *Acropora cervicornis*. *PLoS ONE* (Online)11 (1): e0146636. Available from: doi: 10.1371/journal.pone.0146636 (Accessed 14 January 2019).

Mollica, N. R., Guo, W., Cohen, A. L., Huang, K.-F., et al. (2018) Ocean acidification affects coral growth by reducing skeletal density. *PNAS* (Online)115 (8), 1754–9. Available from: http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1712806115 (Accessed 14 January 2019).

Plaisance, L., Caley, M. J., Brainard, R. E., and Knowlton, N. (2011) The diversity of coral reefs: what are we missing? *PLoS ONE* (Online) 6 (10): e25026. Available from: doi: 10.1371/journal.pone.0025026 (Accessed 14 January 2019).

Pratchett, M. S., Caballes, C. F., Wilmes, J. C., Matthews, S., et al. (2017). Thirty years of research on Crown-of-Thorns Starfish (1986–2016): scientific advances and emerging opportunities. *Diversity* (Online) 9 (4), 41. Available from: doi: 10.3390/d9040041 (Accessed 14 January 2019).

Putman, H. M., Barott, K. L., Ainsworth, T. D., and Gates, R. D. (2017). The vulnerability and resilience of reef-building corals. *Current Biology* 27, R528–40. Available from: http://dx.doi.org/10.1016/j.cub.2017.04.047.

Reaka-Kudla, M. L. (1997) The global biodiversity of coral reefs: a comparison with rain forests. In M. L. Reaka-Kudla, D. E Wilson, and E. O. Wilson (eds) *Biodiversity II: Understanding and Protecting Our Biological Resources*. Washington, DC: Joseph Henry Press, pp. 83–108 Available from: https://doi.org/10.17226/4901.

Roche, R. C., Williams, G. J., and Turner, J. R. (2018) Towards developing a mechanistic understanding of coral reef resilience to thermal stress across multiple scales. *Current Climate Change Reports* 4 (1), 51–64. Available from: https://doi.org/10.1007/s40641-018-0087-0.

Romañach, S. S., DeAngelis, D. L., Koh, H. L., Li, Y., et al. (2018) Conservation and restoration of mangroves: global status, perspectives, and prognosis. *Ocean and Coastal Management* 154, 72–82. Available from: https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.01.009.

Uthicke, S., et al. (2015) Outbreak of coral-eating Crown-of-Thorns creates continuous cloud of larvae over 320 km of the Great Barrier Reef. *Sci. Rep.* (Online) 5, 16885. Available from: doi: 10.1038/srep16885 (Accessed 14 January 2019).

Van Oppen, M. J. H., Gates, R. D., Blackall, L. L., et al. (2017) Shifting paradigms in restoration of the world's coral reefs. *Global Change*

Biology (Online) 23, 3437–48. Available from: doi: 10.111/gcb.13647. (Accessed 19 January 2019).

الفصل السادس: بيولوجيا أعماق المحيطات

Anonymous (2018) The house that sank: creatures called giant larvaceans help ferry food—and pollution—to the deeps. *The Economist*, 22 and 28 September 2018, p. 68. Available from: https://www.economist.com/science-and-technology/2018/09/20/giant-larvaceans-make-their-houses-from-mucus (Accessed 16 January 2019).

Clark, M. R., Tittensor, D., Rogers, A. D. P., et al. (2006) *Seamounts, Deep-Sea Corals and Fisheries: Vulnerability of Deep-Sea Corals to Fishing on Seamounts beyond Areas of National Jurisdiction*. Cambridge: UNEP-WCMC.

Conniff, R. (2017) Up from the depths: the mass nighttime movement of life from deep sea up to surface is Earth's largest wildlife migration—a vertical feast that helps fuel the planet. (Online) Available from: https://www.nwf.org/Magazines/National-Wildlife/2018/Dec-Jan/Animals/Vertical-Migration (Accessed 24 January 2019).

Copley, J. (2014) Mapping the deep, and the real story behind the "95% unexplored" oceans. (Online) Available from: http://moocs.southampton.ac.uk/oceans/2014/10/04/mapping-the-deep-and-the-real-story-behind-the-95-unexplored-oceans/.

Dubilier, N., Bergin, C., and Lott, C. (2008) Symbiotic diversity in marine animals: the art of harnessing chemosynthesis. *Nat Rev Micro* (Online) 6, 725–40. Available from: DOI: 10.1038/nrmicro1992 (Accessed 19 January 2019).

Etnoyer, P. J. (2010) Deep-sea corals on seamounts. *Oceanography* 23 (1), 128–9.

The Five Deeps Expedition (n.d.) The world's first manned expedition to the deepest point in each of the five oceans. (Online) Available from: https://fivedeeps.com/ (Accessed 6 July 2019).

Forest & Bird (n.d.) Best fish guide 2017. (Online) Available from: http://bestfishguide.org.nz/ (Accessed 16 January 2019).

Katija, K., Choy, C. A., Sherlock, R. E., Sherman, A. D., and Robison, B. H. (2017) From the surface to the seafloor: how giant larvaceans transport microplastics into the deep sea. *Science Advances* (Online) 3 (8), e1700715 Available from: DOI: 10.1126/sciadv.1700715 (Accessed 16 January 2019).

Lampert, W. (1989) The adaptive significance of diel vertical migration of zooplankton. *Functional Ecology* 3, 21–7.

Marine Stewardship Council (2016) Orange Roughy: the extraordinary turnaround. From a troubled history to Marine Stewardship Council certification. (Online) Available from: http://orange- roughy-stories .msc.org/ (Accessed 16 January 2019).

Nakagawa, S. and Takai, K. (2008) Deep-sea vent chemoautotrophs: diversity, biochemistry and ecological significance. *FEMS Microbiol. Ecol.* (Online) 65, 1–14. Available from: DOI: 10.1111/j.1574-6941.2008.00502.x (Accessed 19 January 2019).

Ramirez-Llodra, E., Brandt, A. Danovaro, R. E., et al. (2010) Deep, diverse and definitely different: unique attributes of the world's largest ecosystem. *Biogeosciences Discussions*, 7, 2361–485.

Roark, E. B., Guilderson, T. P., Dunbar, R. B., Fallon, S. J., and Mucciarone, D. A. (2009) Extreme longevity in proteinaceous deep-sea corals. *PNAS* (Online)106 (13), 5204–8. Available from: https://doi.org/10.1073/pnas.0810875106 (Accessed 16 January 2019).

Smith. C. (2012) Chemosynthesis in the deep-sea: life without the sun.

Biogeosciences Discussions (Online) 9, 17037–52. Available from: doi: 10.5194/bgd-9-17037-2012 (Accessed 15 January 2019).

Smith, C. R. and Baco, A. R. (2003) Ecology of whale falls at the deep-sea floor. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 41, 311–54.

Wikipedia (2019) Challenger Deep. (Online) Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Challenger_Deep (Accessed 14 January 2019).

Woods Hole Oceanographic Institution (2015) Making organic molecules in hydrothermal vents in the absence of life. (Online) Available from: https://www.whoi.edu/news-release/methane-formation (Accessed 16 January 2019).

WoRDSS (n.d.) World Register of Deep-Sea Species. (Online) Available from: http://www.marinespecies.org/deepsea/ (Accessed 14 January 2019).

الفصل السابع: الحياة في مناطق المد والجزر

Anonymous (2003) *Oil in the Sea III: Inputs, Fates, and Effects*. Washington, DC: National Academies Press. Available from: http://www.nap.edu/catalog/10388.html.

Castilla, J. C. and Duran, L. R. (1985) Human exclusion from the rocky intertidal zone of central Chile: the effects on *Concholepasconcholepas (Gastropoda). Oikos* 45, 391–9.

Connell, J. H. (1961) The influence of intra-specific competition and other factors on the distribution of the barnacle *Chthamalus stellatus. Ecology* 42, 710–23.

Michel, J., Esler, D., and Nixon, Z. (2016) *Studies on Exxon Valdez Lingering Oil: Review and Update on Recent Findings—February 2016.* Exxon Valdez Oil Spill Trustee Council.

Paine, R. T. (1994) Marine rocky shores and community ecology: an experimentalist's perspective. Ecology Institute, Oldendorf/Luhe, Germany.

Available from: https://www.int-res.com/articles/eebooks/eebook04.pdf.

Smith, J., Fong, P., and Ambrose, R. (2008) The impacts of human visitation on mussel bed communities along the California coast: are regulatory marine reserves effective in protecting these communities? *Environmental Management* 41 (4), 599–612.

Tomanek, L. and Helmuth, B. (2002) Physiological ecology of rocky intertidal organisms: a synergy of concepts. *Integrative and Comparative Biology* 42 (4), 771–5. Available from: https://doi.org/10.1093/icb/42.4.771.

الفصل الثامن: طعام المحيطات

FAO (2018) The State of World Fisheries and Aquaculture *2018—Meeting the Sustainable Development Goals.* Rome. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

Gaines, S. D., Costello, C., Owashi, B., et al. (2018) Improved fisheries management could offset many negative effects of climate change. *Sci. Adv.* (Online) 4 (8), eaao1378. Available from: DOI: 10.1126/sciadv.aao1378. (Accessed 20 January 2019).

Gill, D. A., Mascia, M. B., Ahmadia, G. N., et al. (2017) Capacity shortfalls hinder the performance of marine protected areas globally. *Nature* 543, 665–9.

IFFO. The Marine Ingredients Organisation (2015) Fish In: Fish Out (FIFO) ratios for the conversion of wild feed to farmed fish, including salmon. (Online) Available from: http://www.iffo.net/fish-fish-out-fifo-ratios-conversion-wild-feed (Accessed 17 January 2019).

Lotze, H. K., Coll, M., and Dunne, J. A. (2011) Historical changes in marine resources, food-web structure and ecosystem functioning in the Adriatic Sea, Mediterranean. *Ecosystems* 14, 198–222.

Marine Stewardship Council (n.d.) Enjoy the seafood you love. (Online) Available from: https://www.msc.org/ (Accessed 17 January 2019).

Montañez, A. (2018) How much of the world's protected land is actually protected? Available from: https://www.scientificamerican.com/article/how-much-of-the-worlds-protected-land-is-actually-protected1/ (Accessed 17 January 2019).

Pauly, D. and Zeller, D. (2016) Catch reconstructions reveal that global marine fisheries catches are higher than reported and declining. *Nat. Commun.* (Online) 7, 10244. Available from: doi: 10.1038/ncomms10244 (Accessed 17 January 2019).

Roberts, C. M., O'Leary, B. C., McCauley, D. J., et al. (2017) Marine reserves can mitigate and promote adaptation to climate change. *PNAS* (Online) 114 (24), 6167–75. Available from: http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1701262114 (Accessed 20 January 2019).

Ryther, J. H. (1969) Photosynthesis and fish production in the sea. *Science* 166, October, 72–6.

Steneck, R. S. (2012) Apex predators and trophic cascades. *PNAS* (Online) 109 (21), 7953–4; DOI: 10.1073/pnas.1205591109 Available from: https://doi.org/10.1073/pnas.1205591109 (Accessed 17 January 2019).

Travis, J., Coleman, F. C., Auster, P. J., et al. (2014) Integrating the invisible fabric of nature into fisheries management. *PNAS* (Online) 111 (2), 581–4. Available from: https://doi.org/10.1073/pnas.1305853111 (Accessed 17 January 2019).

UNEP-WCMC and IUCN (2019) Marine protected planet. (Online) Available from: http://www.protectedplanet.net. (Accessed 17 January 2019).

Watson, R. A. and Tidd, A. N. (2018). Mapping nearly a century and a half of global marine fishing: 1869 to 2015. *Marine Policy* 93, 171–7. Available from: https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.04.023.

WWF (2017) Get to know your seafood. (Online) Available from: http://wwf.panda.org/get_involved/live_green/out_shopping/seafood_guides/ (Accessed 17 January 2019).

Ye, Y., Cochrane, K., Bianchi, G., et al. (2013) Rebuilding global fisheries: the World Summit goal, costs and benefits. *Fish andFisheries* 14, 174–85. DOI: 10.1111/j.1467-2979.2012.00460.x.

الفصل التاسع: مستقبل محيطاتنا

Grip, K. (2017) International marine environmental governance: a review. *Ambio* (Online) 46, 413–27. Available from: DOI 10.1007/s13280-016-0847-9. (Accessed 20 January 2019).

Jackson, J. B. C. (2008) Ecological extinction and evolution in the brave new ocean. *Proceedings of the National Academy of Science of the USA*, 105 Suppl. 1, 11458–65.

Jackson, J. B. C. (2010) The future of the oceans past. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* B 365, 3765–8.

Jones, K. R., Klein, C. J., Halpern, B. S., et al. (2018) The location and protection status of Earth's diminishing marine wilderness. *Current Biology* (Online) 28, 1–7. Available from: https://doi.org/10.1016/j.cub.2018.06.010. (Accessed 20 January 2019).

Lotze, H. K. and McClenachan, L. (2013) Marine historical ecology: informing the future by learning from the past. In M. D. Bertness, J. F. Bruno, B. R. Silliman, and J. J. Stachowicz (eds) *Marine Community Ecology and Conservation*. Sunderland, Mass.: Sinauer. Available from: https://www.lenfestocean.org/-/media/legacy/lenfest/pdfs/mcec_ch08.pdf?la=en&hash=41C7D8770BC6AB33744FB13D40CD5A3DB111EDF0.

McCauley, D. J., Pinsky, M. L., Palumbi, S. R., et al. (2015) Marine defaunation: animal loss in the global ocean. *Science* (Online) 347 (6219),

1255641. Available from: DOI: 10.1126/science.1255641. (Accessed 20 January 2019).

Rockström, J., Gaffney, O., Rogelj, J., et al. (2017) A roadmap for rapid decarbonization. *Science* (Online) 355 (6331), 1269–71. Available from: doi: 10.1126/science.aah3443. (Accessed 20 January 2019).

Visbeck, M. (2018) Ocean science research is key for a sustainable future. *Nature Communications* (Online) 9 (690), 1–4. Available from: DOI: 10.1038/s41467-018-03158-3. (Accessed 20 January 2019).

قائمة الصور

(2-4) Depiction of coastal upwelling along the west coast of a continent in the southern hemisphere bringing nutrient-rich seawater to the surface.

(2-5) Zooplankton diversity: (a) Nature Picture Library/Alamy Stock Photo (b) Reproduced from Gary N Calkins (1901). *Marine Protozoa from Woods Hole*. http://www.gutenberg.org. (c) Reproduced from Gary N Calkins (1901). *Marine Protozoa from Woods Hole*. http://www.gutenberg.org. (d) © 2002 MBARI.

(2-6) Major pathways of energy flow through the marine system.

(2-7) Distribution of biomass between producers and consumers in the terrestrial and marine environments. Reproduced from Yinon et al. The biomass distribution on Earth. PNAS, 115 (25): 6506–6511. Copyright © 2018 the Author(s). Published by PNAS. https://doi.org/10.1073/pnas.1711842115. Distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial- NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0). https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/.

(3-1) Global distribution of kelp beds.

(3-2) The structure of a kelp frond.

(3-3) Kelp bed collapse. Mark Corcoran for LA Waterkeeper.

(3-4) Structure of seagrass.

(4-1) Ice core 1 m in diameter showing distinct brown coloration of ice biota. Reproduced from Koh et al. Recent Advances and Future Perspectives in Microbial Phototrophy in Antarctic Sea Ice. *Biology*, 2012, 1(3): 54256. https://doi.org/10.3390/biology1030542. Distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0). https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/.

(4-2) Depiction of the Arctic food web.

(4-3) Antarctic krill. Uwe Kils/Wikimedia Commons/CC BY-SA 3.0.

https://creativecommons. org/licenses/by/3.0/ (c) Image courtesy of the NOAA Office of Ocean Exploration and Research, Hohonu Moana 2016. https://oceanexplorer.noaa.gov/okeanos/explorations/ex1603/logs/mar2/mar2.html.

(6-3) A mass of tube worms bask in warm seawater near a black smoker spewing 400°C fluid at a depth of 2,250 metres. Image credit Verena Tunnicliffe.

(6-4) Remains of a whale fall in Monterey Canyon off the coast of California. Copyright © 2002 MBARI.

(6-5) Feather stars and soft corals living at a depth of about 1,200 metres on Davidson Seamount off the coast of California. NOAA/MBARI 2006.

(7-1) Typical pattern of intertidal zonation at low tide on a rocky shore in Washington State, USA. Bcasterline/Wikimedia Commons/Public Domain.

(7-2) The division of the rocky intertidal into four "universal" zones.

(8-1) Scene at Grimsby fish market, UK in 1906. Chronicle/Alamy Stock Photo.

(8-2) Bottom trawling: (a) Image courtesy of The Monterey Bay Aquarium Seafood Watch program. https://www.seafoodwatch.org/ocean-issues/fishing-and-farming-methods. (b) Photograph by Jeremy Prince.

(8-3) Major groups of commercial marine species.

(8-4) Trends in annual global marine capture fisheries production. Data from Pauly, D. & Zeller, D. (2016) Catch reconstructions reveal that global marine fisheries catches are higher than reported and declining. Nat. Commun. [Online]7:10244. Available from: doi: 10.1038/ncomms10244 [Accessed 17th January 2019]


هنداوي